

На правах рукописи



Казакбаев Вадим Маратович

**РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО СИНХРОННОГО
РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена на кафедре «Электротехника и электротехнологические системы» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: кандидат технических наук
Прахт Владимир Алексеевич

Официальные оппоненты: **Григорьев Максим Анатольевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский
государственный университет (национальный
исследовательский университет)», профессор
кафедры «Электропривод и автоматизация
промышленных установок»

Чавычалов Максим Вячеславович,
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО
«Ростовский государственный университет
путей сообщения», доцент кафедры
«Электрический подвижной состав»

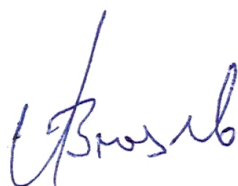
Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет»

Защита диссертации состоится «15» февраля 2017 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.03 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=263173>

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зюзев
Михайлович

Анатолий

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. 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.

Наиболее используемым типом двигателя на сегодняшний день является асинхронный двигатель (АД). Однако традиционная технология асинхронного двигателя для массового электропривода при соблюдении увязки мощностей и присоединительных размеров CELENEC (принята в странах Европейского Союза (ЕС), ГОСТ Р 51689-2000, таблица А.4) уже не удовлетворяет передовым требованиям к энергоэффективности (классы IE3, IE4), задаваемым стандартами МЭК, в диапазоне относительно небольших мощностей (примерно до 50 кВт), который является наиболее массовым и составляет значительную часть общего энергопотребления. При использовании увязки СЭВ (ряд установочных размеров двигателей, принятых странами членами Совета экономической взаимопомощи; принята в РФ и странах СНГ, ГОСТ Р 51689-2000, таблица А.3), предусматривающей меньшую высоту вращения в сравнение с CELENEC, диапазон мощностей, в котором имеются проблемы с реализацией высоких IE классов, еще более расширяется. В любом случае для достижения высоких классов энергоэффективности для АД требуется значительное удорожание и увеличение массы и размеров.

По этим причинам ведущими мировыми производителями и научными организациями ведется поиск неэкстенсивных решений, позволяющих значительно увеличить КПД общепромышленного двигателя. Одним из приоритетных направлений поиска является использование подходящих конструкций синхронных реактивных двигателей, имеющих более высокий КПД чем АД. Синхронный реактивный двигатель (СРД, по английской терминологии – Synchronous Reluctance Motor), в отличие от двигателей с постоянными магнитами (ПМ), не требует использования (и импортирования для производителей РФ и ЕС) дорогих редкоземельных материалов, прост в производстве и эксплуатации, и потенциально практически не уступает двигателям с ПМ по величине КПД.

Диссертационная работа 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 применения СРД.

Актуальность работы обусловлена высоким энергосберегающим потенциалом использования двигателей рассматриваемого типа и необходимостью дальнейшей разработки вопросов проектирования и испытания таких двигателей.

Степень разработанности темы исследования. История разработки энергосберегающих двигателей переменного тока для работы в составе регулируемого привода занимает не одно десятилетие. На протяжении XX века были разработаны вопросы теории работы асинхронных (Костенко М.П., Булгаков А.А., Гольдберг О.Д., Иванов-Смоленский А.В., Шрейнер Р.Т., Панкратов В.В., Макаров Л.Н., Дементьев

Ю.Н., Поляков В.Н., Браславский И.Я. и др.) и синхронных двигателей (Вейнгер А.М., Lipo T. и др.) при работе от преобразователя частоты (ПЧ). В 2000-2010-х гг. вопросами проектирования асинхронных двигателей, в том числе адаптированных для работы от ПЧ, с учетом требований к их энергоэффективности, согласно стандартам ГОСТ и МЭК занимались Беспалов В.Я., Кобелев А.С., Кругликов О.В., Макаров Л.Н и др.

Отдельным направлением является разработка энергосберегающего трехфазного синхронного реактивного двигателя с синусоидальным распределением обмотки статора, активно начавшаяся с 1960 гг. и идущая по настоящее время. Проблема была разработана как для двигателей с прямым питанием от сети, так и для двигателей с питанием от ПЧ (Уриновский Д.С., Кононенко Е.В., Беспалов В.Я., Lawrenson P., Honsinger V., Franceschini G., Miller T., Betz R., Lipo T., Vagati A., Pellegrino G. и др.). Ведущие мировые производители и научные организации исследуют характеристики данного типа двигателя и осваивают производство СРД традиционной трехфазной конструкции и подобных двигателей, достигая высоких рабочих свойств для экспериментальных и серийных образцов. За рубежом среди крупных фирм, освоивших серийное производство энергоэффективных СРД можно отметить международный концерн ABB ("ASEA Brown Boveri"), немецкую компанию KSB ("Klein, Schanzlin & Becker"), а также и компанию Siemens. В России ПАО «НИПТИЭМ» в 2015 была представлена разработка образцов трехфазного СРД мощностью 18,5-110 кВт. Разработкой различных вариантов конструкции 3-х фазного СРД с питанием от сети также занимаются в Томском политехническом университете (ТПУ).

Близкими по преимуществам, хотя и существенно различными по рабочим свойствам и методике проектирования, к трехфазным СРД являются также вентильно-индукторный двигатель (разработкой занимаются Южно-Уральский государственный университет (ЮУрГУ), Московский энергетический институт (технический университет) (МЭИ), ОАО «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт электровозостроения (ОАО «ВЭЛНИИ»), Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС) и др.) и синхронный реактивный двигатель независимого возбуждения (разработкой занимается ЮУрГУ).

Однако не все проблемы решены. Вопрос о максимальных рабочих свойствах СРД с учетом ограничений современной серийной технологии производства и требований целевого приложения все еще требует дальнейшего рассмотрения. В частности не вполне неясным остается вопрос: может ли СРД классической трехфазной конструкции быть рентабельным энергосберегающим решением, достигая высоких энергетических и массогабаритных показателей, при реализации двигателя с увязкой мощностей и размеров СЭВ для применения в регулируемом приводе насосов и вентиляторов, в условиях российской промышленности.

Целью диссертационной работы 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.

Задачи, которые были поставлены для достижения указанной цели:

- проведение аналитического обзора современных требований к энергоэффективности общепромышленного трехфазного двигателя переменного тока. Проведение аналитического обзора возможных способов повышения энергоэффективности трехфазного двигателя переменного тока, с целью соответствия передовым требованиям. Осуществление оценки перспективности применения СРД, в сравнение с другими доступными решениями для увеличения КПД двигателя;

- проведение анализа различных конструкций ротора СРД, описанных в отечественной и зарубежной литературе; осуществление выбора конструкции ротора, наиболее подходящей для целевого приложения;

- разработка алгоритма расчета магнитной системы, позволяющего, в рамках классической методики проектирования, учесть особенности работы СРД от преобразователя частоты с векторным токовым управлением, особенности конструкции ротора, произвести уточненный расчет индуктивностей и магнитных потерь рабочего режима;

- разработка компьютерной математической модели, позволяющей, с помощью рассчитанных или измеренных электрических параметров схемы замещения, оценить рабочие свойства СРД в статических и динамических режимах, при применении различных источников питания, с учетом насыщения, магнитных и механических потерь;

- экономический расчет и технические обоснование целесообразности применения СРД в рассматриваемом приложении (привод вентиляторных и насосных установок);

- разработка и изготовление образца СРД в статоре серийного асинхронного двигателя;

- проведение анализа современных стандартных методов определения КПД трехфазных двигателей переменного тока с питанием от ПЧ, с целью определения наиболее подходящего экспериментального метода;

- разработка и реализация испытательного стенда для определения величины потерь и КПД для двигателей с питанием от ПЧ, согласно ГОСТ Р МЭК 60034-2-1-2009 (МЭК 60034-2-1) и МЭК 60034-2-3, методом входной и выходной мощности (прямой метод);

- проведение сравнительного экспериментального исследования рабочих и энергетических параметров рассматриваемых образцов АД и СРД в широком диапазоне моментов нагрузки и скоростей вращения; определение КПД и класса энергоэффективности двигателей, согласно ГОСТ Р 54413-2011 (МЭК 60034-30-1) и МЭК 60034-30-2.

Областью исследования являются электродвигатели переменного тока, предназначенные для работы в составе регулируемого электропривода.

Объектом исследования является трехфазная синхронная реактивная электрическая машина с синусоидальным распределением обмотки статора, без обмоток на роторе, с питанием от преобразователя частоты.

Научная новизна результатов исследований заключается в следующем:

- разработан алгоритм уточненного расчета рабочих характеристик трехфазного СРД без пусковой обмотки, с питанием от ПЧ;

- разработан метод косвенного определения КПД двигателя рассматриваемого типа, путем сложения отдельных составляющих потерь;

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

Теоретическая и практическая значимость работы:

- обосновано применение двигателя рассматриваемого типа в энергоэффективном регулируемом электроприводе, показана реализуемость и экономическая целесообразность такого решения;

- разработана математическая модель СРД, включая магнитный расчет и расчет динамических режимов, для оценки рабочих и энергетических характеристик при работе в составе регулируемого привода;

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

- создана современная экспериментальная установка для определения КПД двигателей переменного тока с питанием от ПЧ методом входной и выходной мощности;
- получены достоверные экспериментальные данные, подтверждающие реализуемость СРД класса энергоэффективности IE4, согласно МЭК 60034-30-1, и класса IE3, согласно МЭК 60034-30-2, при выполнении двигателя в увязке мощностей и присоединительных размеров СЭВ, в широком диапазоне мощностей, включая мощности менее 1 кВт.

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при разработке и производстве серийных двигателей рассматриваемого типа с классом энергоэффективности IE3 и выше, согласно МЭК 60034-30.

Методология и методы исследований. В работе использовались методы теоретического и экспериментального исследования. При решении поставленных расчетных задач использовалась широко распространенная методология комбинированного подхода, основанного на сочетании метода теории поля и теории электрических цепей. В области математического моделирования СРД применялись программные продукты Matlab (Simulink), FEMM 4.2. При выполнении экспериментального исследования образцов производились наблюдение и измерение, которые были необходимы для проверки и уточнения результатов теоретического анализа. Испытания по определению величины потерь и КПД проводились в соответствии с рекомендациями и методами, изложенными в стандартах МЭК 60034-2-1 и МЭК 60034-2-3. При обработке больших массивов экспериментальных данных использовались статистические методы метрологии.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель для расчета рабочих характеристик СРД без пусковой обмотки, с питанием от ПЧ, с учетом насыщения, магнитных и механических потерь;
2. Результаты технико-экономического обоснования применения СРД как общепромышленного двигателя в регулируемом электроприводе;
3. Рекомендации по выбору типа конструкции ротора и других проектных характеристик СРД для применения в целевом приложении;
4. Методика косвенного определения КПД двигателя рассматриваемого типа, путем сложения отдельных составляющих потерь;
5. Результаты сравнительных экспериментальных исследований рабочих свойств и показателей энергоэффективности опытных образцов АД и СРД.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы обеспечены:

- корректностью принятых допущений при математическом моделировании физических процессов;
- использованием современного программного обеспечения при проведении расчетов на ЭВМ.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях, семинарах, совещаниях. В том числе на Международной конференции «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий» АПЭЭТ-2014 (Екатеринбург, УрФУ, 17-20 марта 2014 г.); Научно-практической конференции с международным участием «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Екатеринбург, УрФУ, 16-19 декабря 2014 г.); Международной научно-технической конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах» (Севастополь, СевНТУ, 15-19 сентября 2015 г.); Шестнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» – ЭППТ 2015 (Екатеринбург, УрФУ, 5-9 октября 2015 г.); Девятой международной (двадцатой всероссийской) конференции «по автоматизированному электроприводе АЭП-2016 (ICPDS'2016)» (Пермь, 3-7 октября 2016 г.); Electrical Machines

and Systems (ICEMS), 2015 18th International Conference (Thailand, Pattaya, October 2015 г.); International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), (Italy, Capri, June 2016 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 15 научных работ, из них 2 в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, и 2 в изданиях, индексируемых в системе цитирования Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 94 наименований. Общий объем работы составляет 128 страниц, 46 рисунков, 24 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, освещается состояние научной разработанности проблемы, формулируются цель и задачи, определяются область и объект исследования, раскрывается научная новизна, излагается теоретическое и практическое значение работы, перечисляются положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации результатов.

В первой главе обозначены тенденции, обуславливающие необходимость проектирования и применения энергоэффективных общепромышленных электродвигателей, выделены современные требования к показателям энергоэффективности. Обосновывается применение стандартов на величину КПД, для общепромышленных двигателей, эксплуатируемых в РФ и странах СНГ, вводимых Международной электротехнической комиссией (МЭК, IEC). Отмечено, что к 2015 году для большинства нерегулируемых электродвигателей, вводимых в эксплуатацию в странах ЕС, законодательно предъявляется требование соответствия классу IE3 (IE2 для двигателей регулируемого привода), согласно стандарту МЭК 60034-30-1. В перспективе планируется также законодательное утверждение требований класса IE4. Кроме того, планируется введение различных норм для нерегулируемых и регулируемых двигателей. Требования к КПД регулируемых двигателей (с питанием от ПЧ) описаны в стандарте МЭК 60034-30-2, который по состоянию на 2016 год находится в разработке (Рисунок 1).

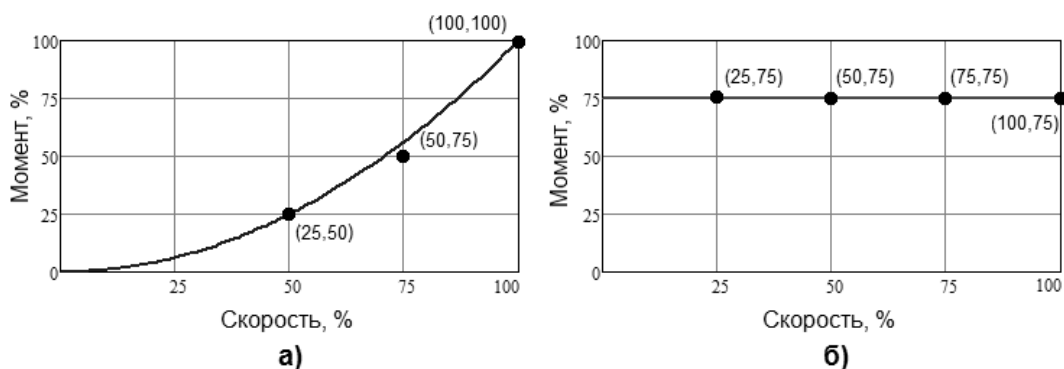


Рисунок 1– Нагрузочные точки, согласно МЭК 60034-30-2 а) регулируемый двигатель в «насосном» приложении; б) регулируемый двигатель в «конвейерном» приложении

Согласно МЭК 60034-30-2 при определении IE-класса КПД двигателя должен быть измерен не только в номинальном режиме, но и в ряде режимов с пониженными моментом и скоростью вращения (Рисунок 1). При этом нормирующий КПД определяется как сумма величин КПД в каждом из этих режимов, с учетом весовых коэффициентов, которые должны отражать относительную продолжительность работы в определенном режиме. Введение МЭК 60034-30-2, означает дальнейшее увеличение требований: для соответствия высокому IE классу регулируемый двигатель должен иметь не только высокий КПД в номинальном режиме, но и сохранять достаточно высокий

КПД при уменьшении нагрузки при работе с определенным нагрузочным профилем $T(n)$, где T – момент нагрузки; n – частота вращения.

Наиболее используемым и отлаженным в производстве и в эксплуатации типом двигателя на сегодняшний день является АД. Поэтому возможности увеличения КПД АД, в целях соответствия новым требованиям, должны быть рассмотрены в первую очередь.

Большинство АД имеющихся сегодня на рынке имеет класс IE2 (в странах ЕС) и класс IE1 (в РФ и СНГ). На основе проведенного анализа возможностей дальнейшего снижения отдельных типов потерь в АД, в работе сделан вывод, что традиционная технология АД для массового электропривода при соблюдении увязки мощностей и присоединительных размеров CELENEC уже не может, без значительного удорожания, увеличения размеров и массы, удовлетворять требованиям класса IE3 и выше. Особенно значительные ограничения возникают в диапазоне малых мощностей (примерно до 50 кВт), который является наиболее массовым и составляет значительную часть общего энергопотребления. При использовании увязки СЭВ, диапазон мощности, в котором имеются проблемы с реализацией высоких IE классов, еще более расширяется. Поскольку значительное улучшение КПД АД, в сравнение с уровнем IE2, возможно лишь экстенсивными методами: использование большего количества меди и стали, а также применение медной беличьей клетки ротора, разработчики двигателей обращают внимание на возможность применения различного типа синхронных двигателей, потенциально обладающих лучшими энергетическими свойствами.

На сегодняшний день на рынке энергоэффективных двигателей для питания от ПЧ, помимо АД, имеются также следующие типы машин: трехфазные синхронные двигатели с постоянными магнитами (ПМ) на/в роторе (в английской терминологии – Surface Mounted Permanent Magnet Motor/ Interior Permanent Magnet Motor), трехфазные синхронные реактивные двигатели, вентильно-индукторные двигатели (ВИД), и некоторые другие типы реактивных двигателей (к примеру, многофазный синхронный реактивный двигатель независимого возбуждения, в английской терминологии – Field Regulated Reluctance Machine) В работе обсуждаются достоинства и недостатки вышеназванных решений.

Трехфазный СРД может быть рассмотрен для применения в качестве энергоэффективного общепромышленного двигателя, по крайней мере, на равных, с остальными решениями, названными выше. Отсутствие потерь в обмотке ротора означает больший КПД, меньшую величину перегрева обмотки статора и подшипниковых узлов СРД при той же нагрузке, в сравнение с АД. К числу основных преимуществ СРД также относятся: простая конструкция ротора машины; отсутствие в конструкции ПМ; максимальная унификацией технологии производства с АД; уменьшение момента инерции ротора. В качестве основного недостатка СРД можно назвать некоторое уменьшение $\cos\phi$, в сравнение с АД. Поэтому инвертор для питания СРД должен иметь несколько больший номинал по току при той же мощности двигателя. Однако со стороны сети электропривод с СРД будет иметь ту же величину коэффициента мощности, что и асинхронный привод.

Энергетические и массогабаритные данные СРД рассматриваемого типа в увязке CELENEC рассмотрены, в сравнение с АД, на примере данных некоторых европейских производителей (ABB, KSB). На основе проведенного анализа показано, что серийные СРД, при тех же размерах и массе, что и АД, обладают значительно большей величиной КПД (класс IE4 в габаритах АД класса IE2). Малогабаритные СРД (уменьшенная длина, высота оси вращения и масса) могут иметь тот же класс энергоэффективности, что и АД стандартных размеров (IE2) или выше (IE3) (Рисунок 2).

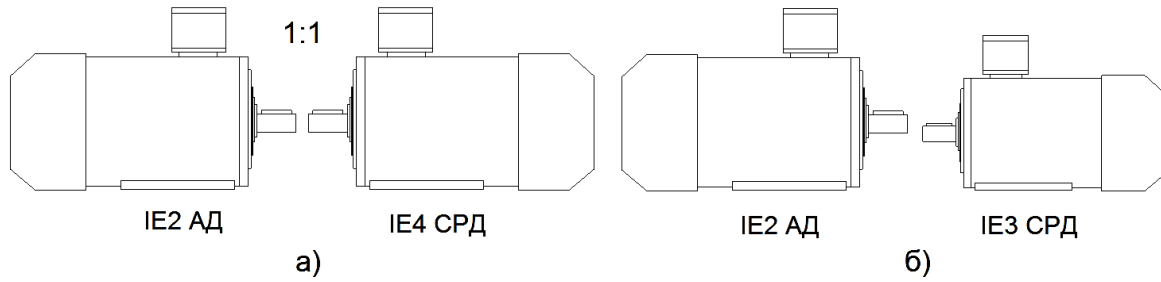


Рисунок 2 – Сравнение энергетических и массогабаритных параметров АД и СРД одних и тех же номиналов на основе каталожных данных серийно производимых двигателей а) АД и высокоэффективный СРД б) АД и малогабаритный СРД

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. Все это позволяет рассматривать СРД как перспективное решение в качестве двигателя энергосберегающего регулируемого привода.

Во второй главе описаны построение и реализация в виде расчетной программы модели СРД на основе уравнений электрического равновесия. Проведен 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 .

Поскольку в отличие от случая работы непосредственно от сети параметры питания зависят от режима работы двигателя, для моделирования двигателя требуется также упрощенное моделирование источника питания на основе автономного инвертора напряжения (АИН). Расчет модели системы СРД-АИН осуществляется с помощью программы MATLAB и библиотек Simulink и SimPowerSystems. Рисунок 3 демонстрирует SimPowerSystems модель описываемой системы.

Модель системы (Рисунок 3) содержит модель двигателя (блок «Motor_1»), модель трехфазного инвертора в виде источника DC напряжения («DC Voltage Source») и структуры из идеальных ключей («Universal Bridge»). Регулирование величин фазных токов реализовано с помощью гистерезисных регуляторов («hyst_reg»). Регулирование скорости реализовано с помощью ПИ-регулятора («PI_control_1»). Также модель включает блоки задания скорости и угла управления $\gamma = \arctg(I_q/I_d)$ и блок формирования задания для величин фазных токов на основе задания модуля вектора тока, заданной величины γ , и обратной связи по углу поворота ротора.

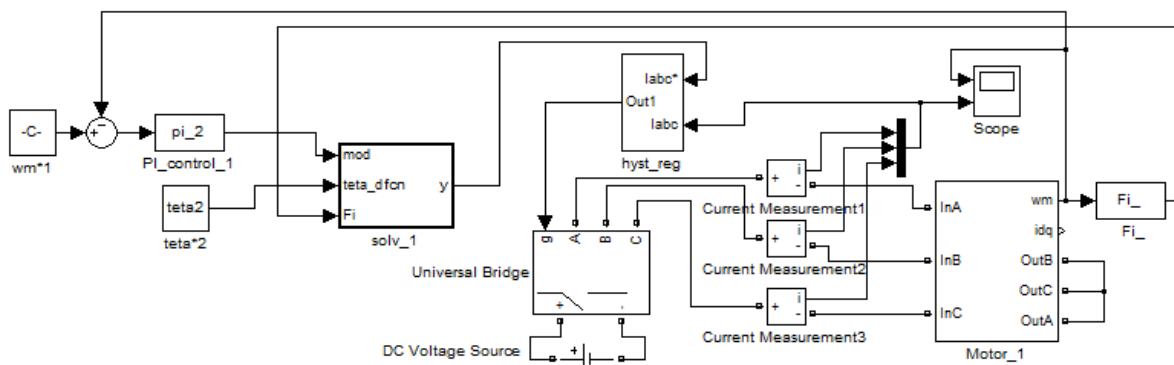


Рисунок 3 – SimPowerSystems модель системы СРД-АИН

Реализация расчета уравнений СРД совместно с уравнениями АИН и системы управления, с помощью численной модели, помимо возможности расчета переходных процессов и учета особенностей источника питания, позволяет также учет нелинейных зависимостей в модели двигателя.

Обычно при составлении уравнений двигателя переменного тока принимают следующие допущения: все фазные обмотки симметричны и имеют одинаковые параметры; распределение МДС статора принимается синусоидальным, влияние высших гармоник МДС и индукции в зазоре не учитывается; насыщение магнитной системы по осям d и q не учитывается; магнитные и механические потери не учитываются. Однако неучет всех значимых типов потерь является неприемлемым при необходимости достаточно точного расчета КПД. В связи с особенностями конструкции ротора СРД также оказывается критичным учет насыщения магнитной системы по осям d и q . Поэтому модель СРД была доработана, с учетом магнитных и механических потерь, а также с учетом насыщения.

Экспериментальные зависимости потокосцепления от тока $\lambda_d(i_d)$ и $\lambda_q(i_q)$ были заданы в модели с помощью блоков “Lookup table” из библиотеки Simulink. Между отдельными точками табличных данных применяется линейная интерполяция. В работе представлена модель без учета перекрестного насыщения, однако при необходимости перекрестное насыщение может быть учтено подобным образом, с помощью двухмерных таблиц $\lambda_d = f(i_d, i_q)$; $\lambda_q = f(i_d, i_q)$, которые также должны быть получены предварительно из экспериментов или магнитного расчета.

Учет магнитных потерь может осуществляться путем добавления в модель фазы сопротивления магнитных потерь R_c . Рисунок 4 показывает схемы замещения СРД в осях d - q с учетом сопротивления R_c .

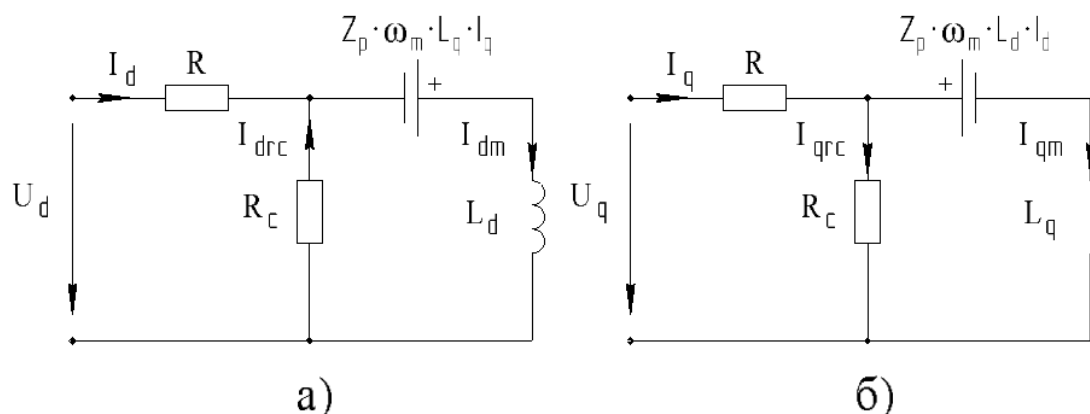


Рисунок 4 – Схемы замещения фазы СРД в d - q осях, с учетом магнитных потерь

При анализе уравнений можно заключить, что магнитные потери уменьшают величину вектора намагничивающего тока, в сравнении со случаем отсутствия R_c и, следовательно, уменьшают величину создаваемого машиной момента при той же величине вектора полного тока. При этом в машине также протекают токи i_{drc} и i_{qrc} и выделяется мощность потерь $P_{fe} = 1,5 \cdot R_c \cdot (i_{drc}^2 + i_{qrc}^2)$, где 1,5 – коэффициент приведения величин во вращающейся системе координат d - q к неподвижной системе a - b - c .

Зависимость величины механических потерь от скорости вращения может быть аппроксимирована из опытных данных, согласно выражению:

$$P_{mech} = B_m \cdot \omega_m^2 + T_k \cdot \omega_m, \quad (1)$$

где ω_m – механическая скорость вращения, рад/с.

Величины B_m и T_k могут быть найдены либо из ряда опытов измерения механических потерь при различных скоростях вращения, либо из опыта свободного выбега двигателя. При решении уравнений соответствующие слагаемые момента механических потерь ($B_m \cdot \omega_m + T_k$) добавляются в уравнение механического равновесия двигателя.

Проведем расчет рабочих характеристик рассматриваемого в работе образца СРД на основе измеренных параметров, с использованием описанной модели. Даны результаты расчета для режима с параметрами: $I_{rms} = 3,362$ А ($I_m = 4,755$ А); $\gamma = 60^\circ$, $f = 100$ Гц ($n = 3000$ об/мин), для которого имеются экспериментальные данные. Для расчета по линейной модели примем параметры машины, определенные из этого же эксперимента при расчете по векторной диаграмме: $R = 3$ Ом; $L_d = 0,154$ Гн; $L_q = 0,0273$ Гн. Для расчета по модели с учетом насыщения используем зависимости $\lambda_d(i_d)$ и $\lambda_q(i_q)$, полученные из опыта с заторможенным ротором. Магнитные потери, определенные из эксперимента, для этого режима составили $P_{fe} = 41$ Вт. Соответствующее сопротивление магнитных потерь – $R_c = 2141$ Ом. Измеренные механические и вентиляционные потери на данной скорости составили $P_{mech} = 30$ Вт (двигатель работал с вентилятором, предназначенным для работы на 1500 об/мин, так что потери могут быть еще несколько снижены при использовании менее производительного вентилятора).

На основании сопоставления эксперимента и расчетных данных (Таблица 1) можно заключить, что корректная оценка токов и напряжений двигателя в рассматриваемом режиме зависит в первую очередь от точности задания в модели индуктивностей L_d и L_q . От этого же фактора, а также от корректности определения активного сопротивления обмотки статора R , зависит точность учета электрических потерь.

Таблица 1 – Сопоставление результатов эксперимента и моделирования

Величина	Эксперимент	Без учета насыщения, без учета P_{fe} ($L_d = \text{const}$, $L_q = \text{const}$, $R_c \rightarrow \infty$)	Без учета насыщения, с учетом P_{fe} ($L_d = \text{const}$, $L_q = \text{const}$, $R_c \rightarrow \text{const}$)	С учетом насыщения, с учетом P_{fe} ($L_d = f(i_d)$, $L_q = f(i_q)$, $R_c \rightarrow \text{const}$)
Потери в обмотке статора, Вт	101	96,071	99,022	99,441
Магнитные потери, Вт	41	0	42,048	38,630
Механические потери, Вт	30	30	30	30
КПД двигателя	0,864	0,897	0,865	0,867
Коэффициент мощности	0,711	0,711	0,700	0,714
U_d , В	63,601	62,03	68,7	60,23
U_q , В	242,722	239	248,7	243,4
I_d , А	2,378	2,351	2,345	2,354
I_q , А	4,118	3,975	4,114	4,065

Можно заключить, что для корректного моделирования СРД в широком диапазоне режимов обязателен учет насыщения по осям d и q , поскольку параметры L_d и L_q в рабочем диапазоне токов изменяются очень существенно (Рисунок 7). В то же время, как видно из результатов расчета для нелинейной модели, хотя неучет перекрестного насыщения и вносит некоторую неточность в оценку импеданса, величины основных рабочих характеристик машины рассчитываются вполне удовлетворительно. Так рассчитанные токи и потери в машине очень близки к экспериментальным, несмотря на то, что индуктивность была определена из опыта с неподвижным ротором, где оси d и q рассматриваются независимо. Это дает основание полагать что, для целей эскизного проектирования эффект перекрестного насыщения возможно не учитывать.

При необходимости более точного расчета с помощью уравнений эффект перекрестного насыщения может быть учтен без существенного изменения модели с помощью применения трехмерных таблиц $\lambda_d = f(i_d, i_q)$, $\lambda_q = f(i_d, i_q)$. Однако подготовка таких таблиц с достаточным шагом изменения токов по расчетным или экспериментальным данным требует информации о множестве рабочих режимов и достаточно трудоемка. По результатам расчета можно также судить об удовлетворительной точности экспериментального метода определения величины

сопротивления магнитных потерь R_c . Данные (Таблица 1) демонстрируют, что самую значительную часть потерь СРД составляют электрические потери в обмотке статора. Однако, несмотря на это, для адекватной оценки КПД двигателя в модели также должны быть учтены магнитные и механические потери.

В третьей главе произведен аналитический обзор различных конструкций ротора СРД, проведено обоснование выбора применяемого варианта конструкции. Рассмотрены особенности магнитного расчета СРД без пусковой обмотки с применением метода конечных элементов. При первых попытках применения СРД в промышленности на протяжении XX века ротор изготавливался путем удаления, обычно с помощью фрезерования, сегментов из уже изготовленного ротора АД. Такие СРД с зубчатым ротором (Рисунок 5а), нашедшие, благодаря синхронной скорости вращения, ограниченное применение в нерегулируемом приводе мощностью до 10 кВт, имеют низкие энергетические показатели и большие габариты, в сравнение с АД. Коэффициент мощности часто не превышает 0,5, а мощность не превышает 40 %, от мощности АД в тех же габаритах. Однако, по сравнению с такими конструкциями, рабочие свойства СРД могут быть значительно улучшены. Максимальные значения коэффициента мощности, КПД, моментной способности (момент на единицу объема) для СРД определяются, в значительной мере, величинами разности и отношения индуктивностей статора по продольной и поперечной оси: $L_d - L_q$, L_d / L_q . Эти величины, в свою очередь определяются конструкций ротора СРД. В 1950-1970 гг. был предложен ряд конструкций, несколько улучшающих эти параметры (Рисунок 5б). Однако рабочие свойства СРД оставались относительно низкими.

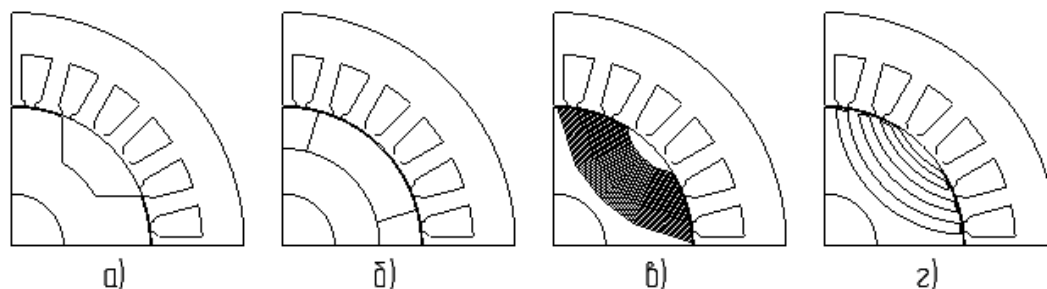


Рисунок 5 – Варианты конструкции ротора СРД а) зубчатый; б) сегментированный; в) с продольным расположением листов; г) с магнитными барьерами

По мере развития технологии регулируемого полупроводникового привода, активно разрабатываются две конструкции ротора, позволяющие СРД получить свойства, сопоставимые с АД: ротор с продольным расположением отдельных листов («axially laminated anisotropic rotor», ALA) (Рисунок 5в) и ротор с традиционной шихтовкой с магнитными барьерами, образованными специальными пазами в листах ротора («transversally laminated anisotropic rotor», TLA) (Рисунок 5г). В работе анализируются достоинства и недостатки ALA и TLA конструкций. Несмотря на теоретически более высокие величины $L_d - L_q$ и L_d / L_q для ALA ротора, большинство серийно производимых СРД имеют TLA конструкцию. Определяющими достоинствами TLA ротора в рассматриваемом приложении являются намного более простая и менее дорогая технология производства, максимально унифицированная с АД, а также потенциально более высокий КПД, по причине меньших магнитных потерь в роторе при достаточно высокой частоте вращения (двигатели со скоростью вращения 1500 об/мин и выше). Для сравнительного изучения рабочих характеристик в рамках данной работы также была выбрана конструкция СРД с ротором с магнитными барьерами, наиболее подходящая требованиям рассматриваемого приложения.

Магнитное поле в воздушном зазоре и роторе даже для СРД традиционной конструкции (Рисунок 5а) имеет сложный вид. Расчет же СРД рассматриваемой конструкции (Рисунок 5г) является еще более трудной задачей, практически не решаемой

с достаточной точностью без применения численных методов (метода конечных элементов, МКЭ, в английской терминологии – Finite Element Method, FEM). Это вызвано наличием в роторе внутренних дополнительных пазов (магнитных барьеров), существенно влияющих на картину поля и разветвляющих магнитный поток в роторе. Особенности магнитной цепи по оси q (наличие «мостов насыщения» между магнитными барьерами) и малая величина зазора по оси d , обуславливают необходимость учета насыщения стали при расчете величин L_d и L_q . Более того, при проектировании СРД имеет место проблема пульсаций момента, вибраций и шума, хотя в отличие от машин с явными полюсами на роторе и на статоре, эти пульсации не так велики и, при правильном проектировании, сопоставимы с АД. Все это обуславливает применение МКЭ при расчете СРД. В числе наиболее используемых пакетов для МКЭ расчета электрических машин можно назвать Comsol, Ansys, FEMM, Quick field (Elcut). Изучение возможностей данных программных пакетов показало, что наилучшим образом для решения поставленных в работе задач подходит пакет FEMM.

Методики, использующие FEM-расчет при проектировании СРД, как правило, являются полуаналитическими. Исходя из технического задания, с помощью аналитической процедуры находится начальное приближение для конструкции СРД. При этом конструкция ротора описывается конечным набором параметров (число магнитных барьеров, отношение толщины барьера и продольного ребра, коэффициент полюсного перекрытия и др.). Далее производится ряд расчетов при автоматическом варьировании структуры ротора (в некоторых случаях и статора) в терминах выделенных параметров, с целью оптимизации рабочих свойств. В работе рассматривается построение ряда процедур магнитного расчета, реализованных на базе программ MATLAB и FEMM, составляющих основу программного комплекса численной оптимизации СРД: расчет L_d и L_q рабочего режима с учетом насыщения; расчет момента и пульсаций момента; расчет магнитных потерь, с учетом потерь в роторе.

Основными параметрами режима СРД, которые должны быть получены из магнитного расчета, являются величины индуктивностей статора L_d и L_q . Для независимого вычисления L_d и L_q можно провести расчеты с совпадением МДС статора с одной из синхронных осей (Рисунок 6а,б). В этом случае величины индуктивностей рассчитываются без влияния перекрестного насыщения. Расчет при учете насыщения и шихтованности стали проводится при различной амплитуде тока. Далее с помощью интегрирования векторного магнитного потенциала A_z вычисляется потокосцепление фазы, ось которой совпадает с направлением МДС. Индуктивность фазы определяется как отношение амплитуды потокосцепления Λ_m к амплитуде тока I_m . Расчет ведется на один полюс машины.

При рассмотрении картин поля, видно, что при совпадении МДС с осью d поток проходит через ротор практически беспрепятственно (Рисунок 6а) и индуктивность примерно равна индуктивности машины с однородным стальным круглым ротором. При совпадении МДС с осью q практически весь поток вынужден замыкаться по тонкому внешнему контуру, который входит в сильное насыщение. Путь по основной части ротора ему преграждают магнитные барьеры (Рисунок 6,б). Очевидно, что получения адекватного результата для L_q в данном случае необходим учет насыщения.

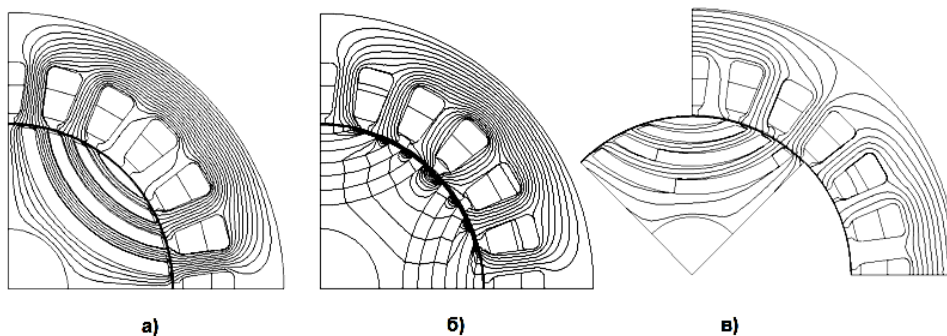


Рисунок 6 – Расчет параметров СРД а) по продольной оси б) по поперечной оси в) в рабочем режиме

Можно заметить, что состояние магнитной системы при этих расчетах соответствует опыту с заторможенным ротором с соединением фазных обмоток в звезду и однофазным питанием этой схемы. Поэтому возможно прямое сопоставление расчета с экспериментом. Рисунок 7 показывает такое сопоставление.

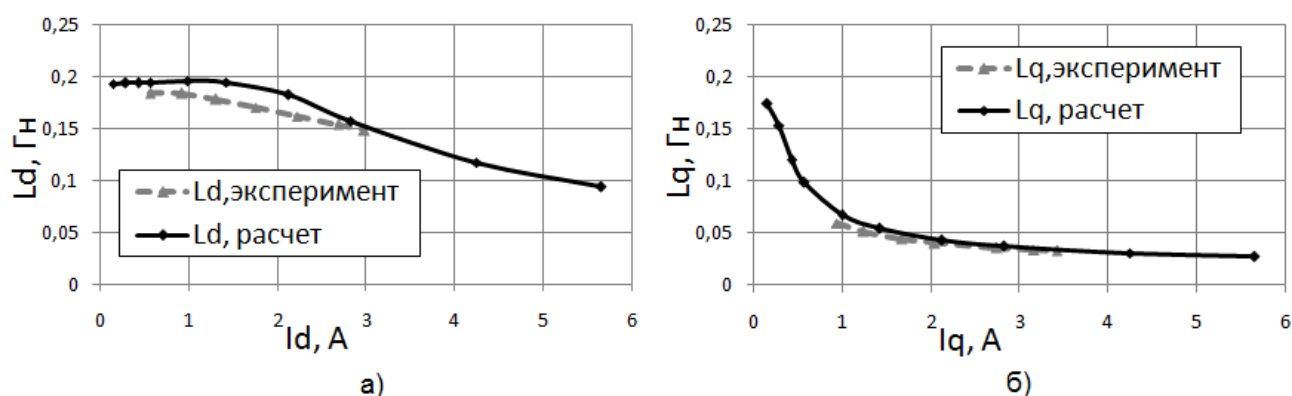


Рисунок 7 – Рассчитанные и измеренные величины индуктивностей СРД а) по продольной оси б) по поперечной оси

Рассматриваются рабочие характеристики СРД при работе с определенной амплитудой тока и величиной угла γ . Из опытных данных было установлено, что максимальный КПД двигателя при номинальной нагрузке достигается приблизительно при величине $\gamma = 60^\circ$, несмотря на то, что минимум тока при номинальном моменте достигается для $\gamma = 53^\circ$. То, что режим с минимумом тока не соответствует режиму с максимальным КПД можно объяснить характером изменения магнитных потерь. По вышеназванной причине, с целью возможности сопоставления с экспериментальными данными ниже представлен расчет для случая $\gamma = 60^\circ$ (Рисунок 6в, Таблица 2). Таблица 2 показывает результаты расчетов для ряда нагрузочных режимов. Также в таблице приведены данные по одному из экспериментальных режимов.

Таблица 2 – Результаты расчета параметров рабочих режимов СРД

I фазн. (RMS), А	γ , град. эл.	i_d , А	i_q , А	L_d , Гн	L_q , Гн	T, Н*М (тензор напряжений)	T', Н*М (по "Ld-Lq")	$n_{расч}$
2,456	55	1,992	2,845	0,1691	0,0357	2,273	2,268	1
1	55	0,811	1,158	0,1832	0,0635	0,3393	0,337	1
2,456	35	2,845	1,992	0,1556	0,0363	1,9755	2,028	1
2,456	35	2,845	1,992	0,156	0,0363	2,0359	2,035	30
1	35	1,158	0,811	0,1868	0,0747	0,3305	0,316	1
3,362	60	2,37	4,12	0,16	0,0298	3,73	3,83	1
Эксперимент								
3,362	60	2,37	4,12	0,154	0,0273	3,508	-	-

По результатам магнитостатического расчета момент, действующий на ротор, оценивается, как с помощью тензора напряжений Максвелла, так и по формуле, полученной на основе уравнений электрического равновесия:

$$T = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot (L_d - L_q) \cdot I_{rms}^2 \cdot \sin(2 \cdot \gamma), \quad (2)$$

где $I_{rms} = I_{max}/\sqrt{2}$ – действующее значение фазного тока; Z_p – число пар полюсов; $i_d = I_{max} \cdot \cos(\gamma)$, $i_q = I_{max} \cdot \sin(\gamma)$.

Можно заметить, что эффективный момент в течение электрического периода достаточно точно оценивается по результатам единственного расчета по формуле (2). Для корректного расчета пульсаций момента в течение периода требуется провести большее количество расчетов с различным положением ротора и статора $n_{расч}$, которое зависит от особенностей геометрии машины, с вычислением момента с помощью тензора напряжений Максвелла. При сопоставлении расчетных и экспериментальных данных для режима с величиной тока 3,362 А (Таблица 2), можно видеть, что расчетная величина момента несколько выше. Главными причинами этого являются неучет в магнитостатическом расчете влияния токов магнитных потерь на моментную способность, а также неучет момента механических потерь. Кроме того расчет дает несколько завышенную величину разности $L_d - L_q$, что может быть связано с неточностью задания свойств материала магнитопровода.

Расчет магнитных потерь осуществляется по результатам вычисления функции индукции в пределах объема каждого конечного элемента по формуле:

$$\Delta P_m = V \cdot \sum_{n=1}^k \left(C_h \cdot f_n \cdot B_n^\beta + C_e \cdot f_n^2 \cdot B_n^2 \right), \quad (3)$$

где n – номер гармоники индукции; k – число учитываемых гармоник; f_n – частота n -ой гармоники; B_n – амплитуда n -ой гармоники; C_h и β – коэффициенты потерь на гистерезис; C_e – коэффициент потерь на вихревые токи; V – объем элемента.

Таблица 3 показывает результаты расчета величины магнитных потерь в рабочем режиме с параметрами $I_{rms} = 3,362$ А ($I_m = 4,755$ А); $\gamma = 60^\circ$, $f = 100$ Гц ($n = 3000$ об/мин). Также для сопоставления дана величина экспериментально оцененных магнитных потерь, которая была рассчитана по экспериментальным данным, вычитанием электрических и механических потерь из общей величины потерь.

Таблица 3 – Результаты расчета и измерения магнитных потерь в рабочем режиме

Величина	Значение
Потери в ярме статора (расчет), Вт	18,10
Потери в зубцах статора (расчет), Вт	10,76
Потери в стали ротора машины (расчет), Вт	13,2
Общие магнитные потери в двигателе (расчет), Вт	42,15
Общие магнитные потери в двигателе (эксперимент), Вт	41,14

На основании расчета можно заключить, что наибольшую часть магнитных потерь в машине составляют потери в статоре. Однако магнитные потери в роторе также значительны, и их неучет может существенно влиять на точность оценки КПД.

В четвертой главе на основе анализа литературных источников было определено, что на момент написания работы стандартные методы определения КПД, подходящие для двигателей с питанием от ПЧ, были описаны только в стандарте МЭК 60034-2-3. Имеются два возможных метода испытания: метод входной и выходной мощности (IEC 60034-2-3, Ed. 1.0, Method 2-3-C) и калориметрический метод (IEC 60034-2-3, Method 2-3-D). Ввиду большей сложности реализации калориметрического метода в работе в

качестве основного метода измерения КПД двигателей использовался метод входной и выходной мощности (прямой метод). Для осуществления экспериментального сравнения рабочих и энергетических характеристик двигателей методом входной и выходной мощности в рамках данной работы был создан испытательный стенд, предназначенный для испытания двигателей с номинальным моментом до 5 Н*м и скоростью вращения до 10 тыс. об/мин.

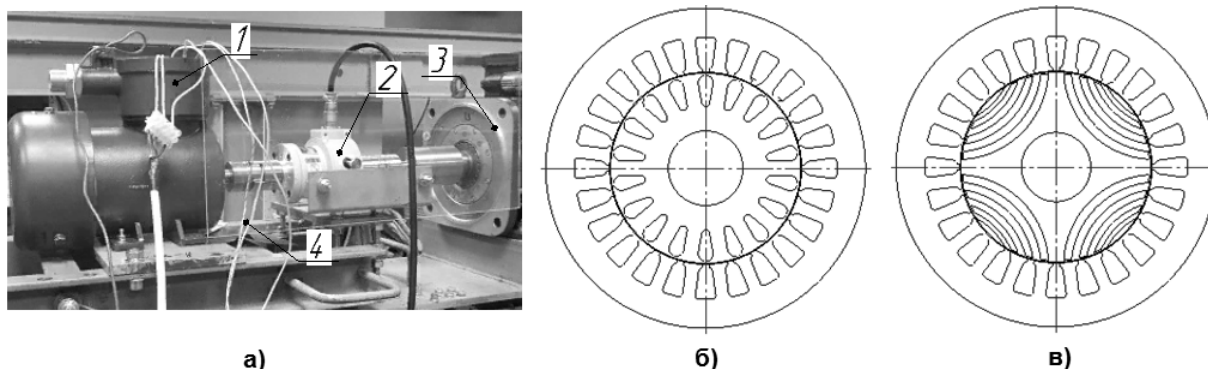


Рисунок 8 – а) Конструкция испытательной установки: 1 - испытуемая машина; 2 - датчик момента; 3 - нагрузочная/приводная машина; 4 - провод датчика температуры обмотки статора; б) Конструкция АД в) Конструкция СРД

Со стороны выходного конца вала испытуемый двигатель соединяется с валом датчика момента TP-50КСМ, 5 Н*м (производитель Kyowa). Другой конец вала датчика момента соединяется с нагрузочной асинхронной машиной. Для измерения электрических величин используются анализатор мощности на базе датчиков тока и напряжения LEM (CV 3-1000, LA 25 NP) и АЦП QMBox20-16. Сигнал скорости вращения может быть получен в цифровом или аналоговом виде, либо от энкодера нагрузочной машины, либо от энкодера испытуемой машины.

При измерении КПД и определении IE класса двигателя важным вопросом является оценка погрешности измерений. Для двигателя мощностью 750 Вт с КПД около 85 % величина погрешности измерения КПД с помощью рассматриваемой установки составила $\pm 0,35$ %. Это было признано допустимым, исходя из критерия малости метрологической погрешности, относительно допускаемого технологического разброса параметров при серийном производстве, в соответствии с МЭК 60034-1.

Рассматриваются результаты испытаний, разработанного с помощью описанной в работе расчетной методики, опытного образца СРД. Рассматриваемый СРД изначально проектировался с номиналами 750 Вт, 3000 об/мин на базе статора асинхронного двигателя АИМЛ 71 А4, 550 Вт, 1380 об/мин. Двигатель АИМЛ 71 А4 имеет 24 паза на статоре и 18 пазов на роторе (Рисунок 8б). Стоит отметить, что двигатели АИМЛ имеют взрывозащищенное исполнение, и габариты их магнитной системы, в диапазоне небольших мощностей, примерно соответствуют габаритам общепромышленных АД класса IE2. Высота оси вращения двигателя $h = 71$ мм.

При изготовлении СРД статор, корпус статора, вал, система вентиляции и все остальные узлы, за исключением пакета ротора и обмотки статора не были изменены, в сравнение с конструкцией АИМЛ 71 А4. Листы ротора были изготовлены путем электроэрозионного вырезания. Машины имеют одинаковую величину воздушного зазора. Двигатель имеет 4-х полюсную конфигурацию с частотой питания 100 Гц. Естественным решением при проектировании двигателя на 3000 об/мин кажется выбор числа пар полюсов машины $Z_p = 1$. Однако практика проектирования показывает, что наибольшая величина L_d/L_q достижима для СРД с $Z_p = 2$, в сравнение с $Z_p = 1$ и $Z_p = 3$. Кроме этого, повышению рабочих характеристик способствуют другие преимущества 4-х полюсных двигателей. Нужно отметить, что использование для СРД того же самого статора, что и для АД, означает неоптимальность конструкции. При увеличении

внутреннего диаметра статора, при том же внешнем диаметре, может быть достигнута большая величина моментной способности.

Рассмотрен вопрос об экспериментальной оценке магнитных потерь в СРД. Для СРД, у которого отсутствуют электрические потери в роторе, магнитные потери составляют более значительную часть потерь, чем для АД. Для проверки корректности методик расчета, соответственно, требуются также точные методы измерения магнитных потерь. Для СРД в режиме нагрузки, в сравнение с опытом холостого хода (х.х.), при той же величине ЭДС статора $U_i = U - I \cdot R$, изменяется величина угла γ , что означает изменение индукции в роторе. Однако, при той же величине ЭДС статора и частоте, величина γ мало влияет на индукцию и магнитные потери в статоре, составляющих большую часть магнитных потерь в СРД. Это дает основание к оценке магнитных потерь СРД на холостом ходу и переносе этой оценки на нагрузочные режимы.

В работе предложена методика проведения опыта х.х. для СРД без пусковой обмотки при работе с источником питания и системой управления, которая используется в нагрузочном режиме. Изменение напряжения на обмотке статора при этом достигается за счет регулирования угла γ . В ходе такого опыта также оцениваются механические потери. Все это позволяет косвенным методом, без непосредственного измерения механической мощности оценить КПД СРД в нагрузочном режиме. Рисунок 9а показывает сравнение величин магнитных потерь СРД, полученных различными. Красная линия показывает величину потерь P_{fe} , оцененную с помощью опыта холостого хода. Синяя линия показывает величину остаточных потерь P_{Lr} , полученных из опыта нагрузки с измерением полных потерь P_T методом входной и выходной мощности. Рисунок 9б показывает сравнение КПД СРД, измеренного прямым методом косвенным методом. Из этих данных видно, что при нагрузке близкой к номинальной (750 Вт) и больше номинала (1100 Вт) косвенный метод позволяет достаточно точно оценить КПД машины.

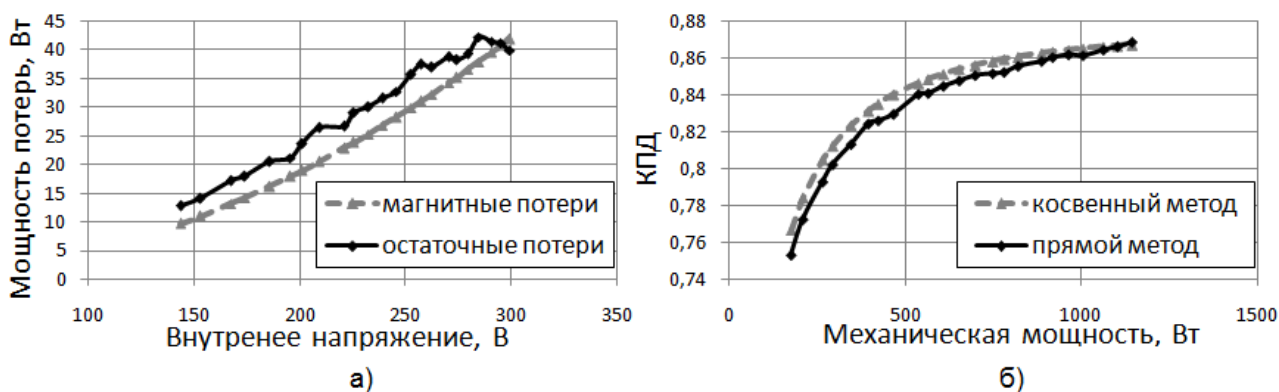


Рисунок 9 – а) Измеренная величина магнитных потерь СРД б) Измеренный КПД СРД

Рассматриваются результаты сравнительных испытаний, разработанного образца СРД, АД, в статоре которого был изготовлен СРД, а также ряда серийных двигателей при работе на различных скоростях с различными величинами нагрузки. Для этого с помощью описанной выше установки были проведены опыты нагрузки двигателей при питании от ПЧ, с измерением электрической мощности на входе и механической мощности на выходе, согласно МЭК 60034-2-3. Для корректности сравнительных испытаний для питания двигателей использовался один и тот же промышленный векторный ПЧ «Emerson Unidrive M 701-034 00031 А». Управление АД с оптимальным КПД в широком диапазоне скоростей и моментов требует введения дополнительных обратных связей и использования дорогостоящих ПЧ с дополнительными опциями. В наиболее же распространенных, относительно недорогих ПЧ используется, либо скалярное U/f управление в разомкнутом контуре, либо векторное управление при

постоянстве потокосцепления ротора. Причем лучшие энергетические свойства в насосном приложении достигаются в случае U/f управления. Поэтому в ходе данной работы АД испытывался при регулировании по закону $U/f = \text{const}$. СРД испытывался при использовании векторного управления с датчиком положения по закону $\gamma = \text{const}$. Во всех случаях была установлена несущая частота ШИМ 4 кГц. На валу СРД, со стороны вентилятора, устанавливается инкрементальный энкодер. Рисунок 10 показывает зависимости КПД для образца СРД и двигателя АИМЛ71А2, выполненного на ту же самую мощность (750 Вт, 3000 об/мин) в том же корпусе. В номинальном режиме КПД АД составляет 81,6 % (IE3, согласно МЭК 60034-30-1). КПД СРД – 86,4 % (IE5). При оценке IE класса двигателей, согласно МЭК 60034-30-2, АД и СРД имеют классы IE1 и IE3, соответственно. Разность КПД при 3000 об/мин составляет 4,8 %; при 750 об/мин – уже 21,8 %.

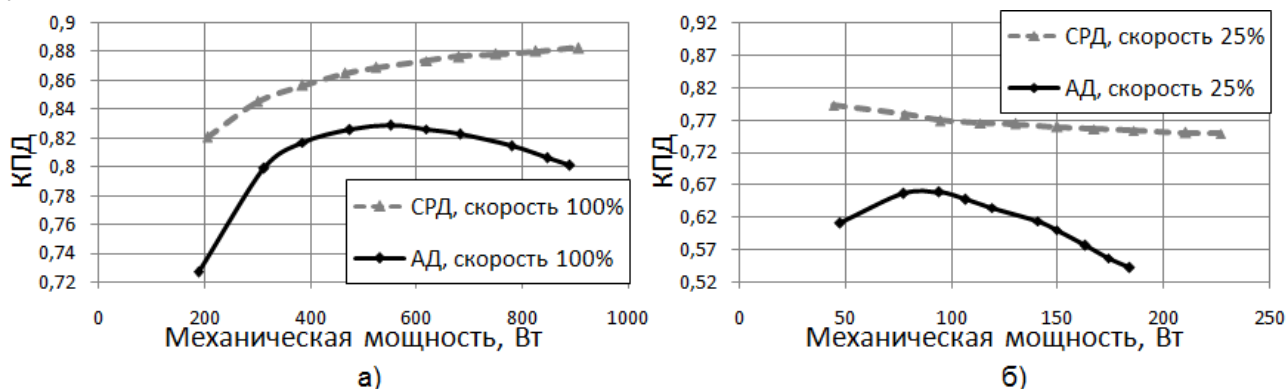


Рисунок 10 –Измеренный КПД АД и СРД в полезной механической мощности
а) скорость 100 % б) скорость 25 %

Рисунок 11 показывает результаты оценки составляющих потерь для АД и СРД при скорости 100% и 25% от номинальной. Выделены: P_s – электрические потери в обмотке статора; P_r – электрические потери в обмотке ротора; P_{fw} – механические и вентиляционные потери; $P_{Lr} = P_T - P_s - P_r - P_{fw}$ – остаточные потери (магнитные и прочие). Главное различие потерь в рассматриваемых машинах состоит в том, что составляющая потерь в обмотке ротора P_r (24 % от P_T для номинального режима АД) в СРД полностью отсутствует. При этом, при той же величине момента при снижении скорости вращения, P_r изменяется мало. Это приводит к увеличению разности КПД АД и СРД при пониженной скорости. Перегрев обмотки статора АД и СРД при 3000 об/мин (Рисунок 11а) составляет 45 и 25 К (°С), соответственно. При 750 об/мин (Рисунок 11б) – уже 65 и 31 К соответственно.

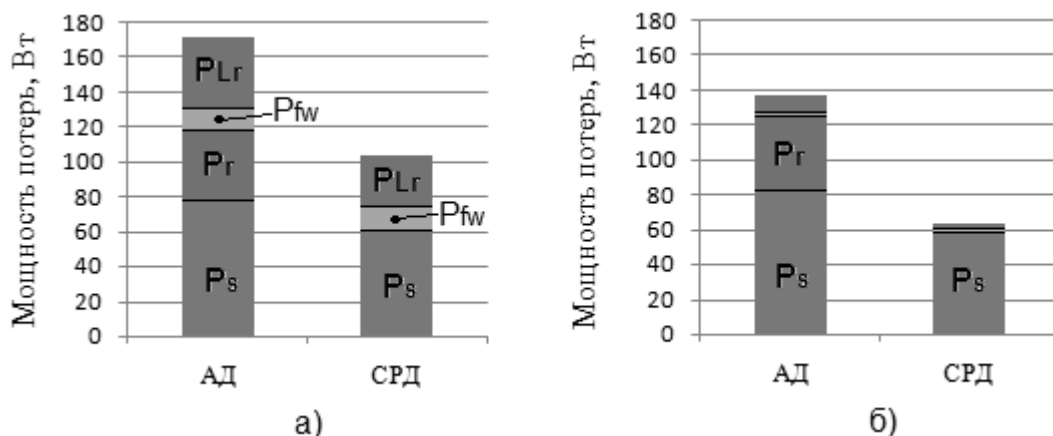


Рисунок 11 – Распределение отдельных составляющих потерь в АД и СРД
в различных режимах работы а) момент 100%, скорость, 100%; б) момент 100 %,
скорость 25%

Рассматривается также сравнение рабочих свойств образца СРД с двигателями АИМЛ71А4 (550 Вт, 1500 об/мин), АИМЛ71В2 (1100 Вт, 3000 об/мин) (Рисунок 12), а также с энергоэффективными АД производства АВВ 750 Вт и 1100 Вт (3000 об/мин, класс IE3, Рисунок 13а): М3АА80В2 и М3АА80С2, соответственно. В целом можно заключить, что КПД образца СРД значительно выше КПД рассматриваемых АД при некотором снижении объема и массы активных материалов, в сравнение с АД 750 Вт, и при значительно снижении – в сравнение с АД 1100 Вт. В сравнение с двигателями класса IE3, у образца СРД также уменьшена высота оси вращения.

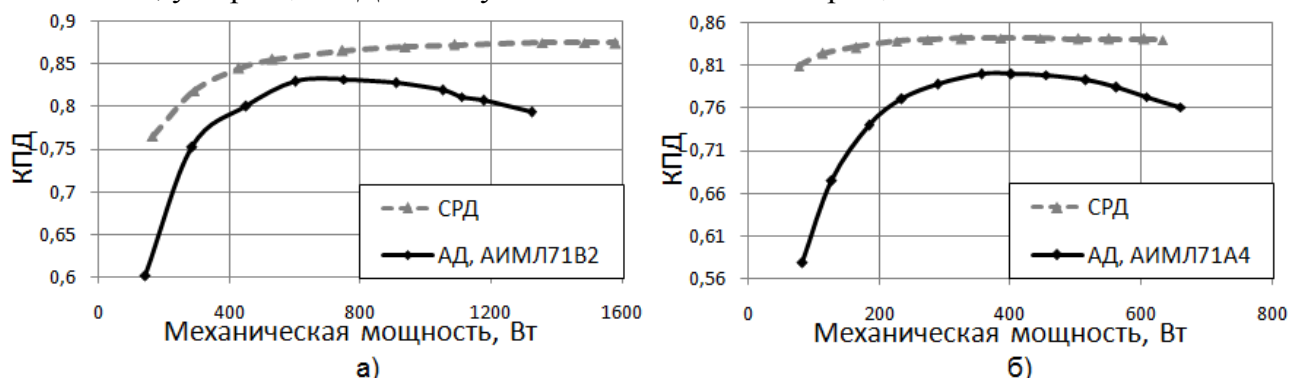


Рисунок 12 – КПД СРД и АД при работе а) с номиналом 1100 Вт, 3000 об/мин
б) с номиналом 550 Вт, 1500 об/мин

Важным является также сопоставление образца СРД с увязкой СЭВ с серийно производимыми СРД с увязкой CELENC. В качестве таких двигателей рассматриваются СРД производства KSB. КПД образца в рассмотренных режимах близок к КПД СРД производства фирмы KSB (Рисунок 13б). В номинальном режиме КПД рассматриваемого образца на 1,2 % больше, чем КПД двигателя SuPremE-2-0,75-80М-В (750 Вт, 3000 об/мин), имеющего близкий объем магнитопровода. КПД двигателя SuPremE-2-1,1-80М-В на 1,2 % выше, чем КПД опытного образца, однако объем и масса его активной части также существенно увеличены.

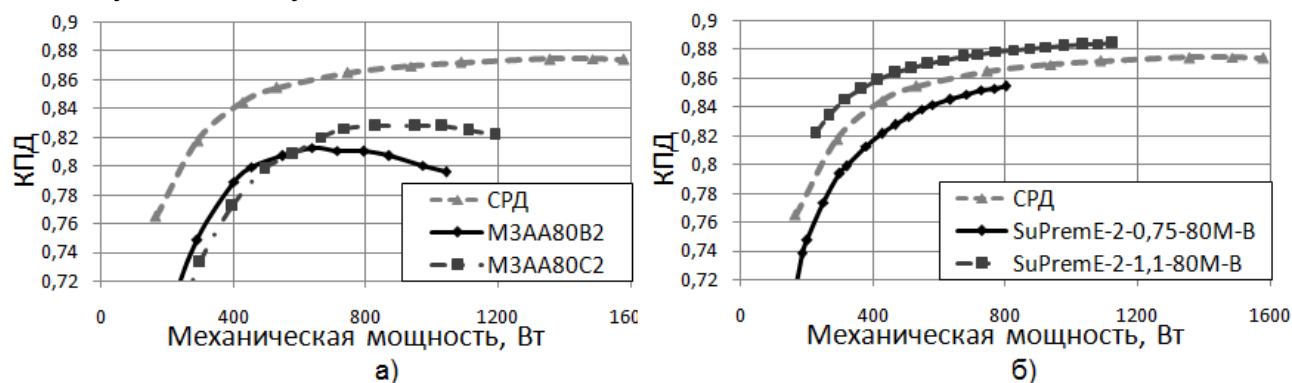


Рисунок 13 – КПД образца СРД в сравнение а) с двигателями М3АА80В2 и М3АА80С2 б) с двигателями SuPremE-2-0,75-80М-В и SuPremE-2-1,1-80М-В

Проведенные сравнительные испытания позволяют сделать 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 насосном приложении. Для оценки используются данные о КПД опытного образца СРД и двигателя АИМЛ71А2 при работе в различных нагрузочных режимах, данные о КПД ПЧ, а также паспортные данные и математическая модель гидравлической части насоса, при работе в составе насосного агрегата мощностью 750 Вт. Таблица 4

показывает результаты расчета энергопотребления, стоимости сэкономленной электроэнергии и срока окупаемости установки СРД.

Таблица 4 – Результаты расчета экономического эффекта от использования СРД

Наименование величины	Значение величины
Действующая цена за электроэнергию, Руб/кВт	2,9
Суточное энергопотребление АД, кВт*ч	7,907
Суточное энергопотребление СРД, кВт*ч	7,212
Суточная экономия электроэнергии, кВт*ч	0,695
Годовая экономия электроэнергии, кВт*ч	253,68
Экономия электроэнергии, %	9,6
Стоимость сэкономленной электроэнергии за год, Руб	735,66
Стоимость установки АД привода (с НДС), Руб	18550
Стоимость установки СРД привода (с НДС), Руб	20339
Срок окупаемости СРД, лет	2,43

По результатам расчета можно заключить, что установка СРД привода на вновь вводимые или требующие капитального ремонта промышленные насосные станции является эффективным и целесообразным энергосберегающим мероприятием, с учетом современных цен на электроэнергию и промышленное оборудование в РФ.

В заключении обобщаются выводы, полученные по результатам работы:

1. На основе анализа литературных источников показана актуальность разработки общепромышленных двигателей с высоким классом энергоэффективности. Показано, что: увеличение требований к минимальной величине КПД и классу энергоэффективности общепромышленных двигателей в ближайшие десятилетия станет устойчивой тенденцией в большинстве стран мира; двигатели, массово представленные на рынке на сегодняшний день, не удовлетворяют перспективным требованиям к КПД, согласно МЭК 60034-30, особенно для регулируемых двигателей и для диапазона малых мощностей (требуется либо значительное удорожание и утяжеление АД, либо применение новых технологий); синхронный реактивный двигатель, способный удовлетворять требованию класса IE3 и выше, согласно МЭК 60034-30, без удорожания и перерасхода материалов является перспективным решением в качестве энергосберегающего двигателя регулируемого привода.

2. Реализована математическая модель, позволяющая расчет рабочих характеристик СРД на основе основных уравнений машины, с учетом насыщения, магнитных и механических потерь. Показано, что такая модель позволяет с приемлемой точностью оценивать рабочие и энергетические характеристики СРД при использовании электрических параметров, полученных из эксперимента.

3. На основе сравнения расчетных и экспериментальных данных показано, что относительно большая точность оценки рабочих характеристик в широком диапазоне режимов может быть достигнута при использовании параметров полученных из опыта с заторможенным ротором и опыта холостого хода. Основными причинами неточностей в этом случае являются неучет перекрестного насыщения и неучет изменения величины сопротивления магнитных потерь в различных режимах.

4. На основе анализа литературы был обоснован выбор конструкции ротора с магнитными барьерами для энергоэффективного СРД.

5. На основе анализа литературы, была определена методика проектирования и расчета рабочих характеристик СРД, обладающая достаточной точностью. Был разработан набор расчетных процедур на базе сред MATLAB и FEMM, составляющих основу программы для численной оптимизации конструкции магнитной системы СРД.

6. Рассмотрены особенности магнитного расчета СРД без пусковой обмотки. Выполнены магнитные расчеты рассматриваемой конструкции СРД с учетом насыщения

и магнитных потерь с применением метода конечных элементов. Продемонстрирована приемлемая точность расчета параметров магнитной системы на примере расчета рассматриваемого в работе образца СРД.

7. По результатам анализа литературы обоснован выбор используемого метода экспериментального сравнения энергетических свойств АД и СРД. Разработана испытательная установка для определения КПД и потерь двигателей с питанием от ПЧ методом входной и выходной мощности.

8. Предложен метод косвенной оценки величины КПД СРД рассматриваемого типа.

9. По результатам ряда сравнительных испытаний показано существенное увеличение КПД и класса энергоэффективности разработанного образца СРД (IE4) в сравнение с АД в том же корпусе (IE2) и с энергоэффективными АД класса IE3. Также показано значительное уменьшение массы активных материалов СРД, в сравнение АД для этих случаев.

10. На основе опытных данных показано, что СРД класса энергоэффективности IE3 и IE4 могут быть реализованы как в увязке CELENEC, так и в увязке СЭВ, без перерасхода активных материалов.

11. На основе опытных данных показано, что в режимах с пониженной скоростью и моментом разница в КПД СРД и АД может составлять более 20 %, что особенно актуально для приводов насосов и вентиляторов, работающих в таких режимах большую часть времени. Показано, что СРД при тех же габаритах имеет значительно меньшую величину перегрева обмотки статора, в том числе в режимах с пониженной скоростью. Проведен сравнительный анализ отдельных составляющих потерь АД и СРД, выполненных в одном и том же корпусе, при работе от одного и того же преобразователя частоты.

12. Показано, что полученный образец СРД может быть использован не только как двигатель класса IE4 со стандартными габаритами, но и как малогабаритный двигатель на повышенную мощность.

13. По основе опытных данных произведен сравнительный расчет энергопотребления АД и СРД в целевом приложении. Показана существенная экономия электроэнергии и приемлемый срок окупаемости при использовании СРД. Все это делает применение СРД в целевом приложении экономически оправданным решением, даже при современных ценах на электроэнергию в РФ.

14. Сделан вывод, что все названные в работе преимущества позволяют применять СРД как крупносерийный двигатель для самых различных приложений. При этом привод на основе СРД будет иметь значительно улучшенные рабочие характеристики, в сравнение с приводом на основе АД, без существенного увеличения стоимости.

Выполненные исследования имеют **перспективу дальнейшей разработки** и широкого практического использования в плане проектирования и внедрения энергоэффективных синхронных реактивных двигателей для различных приложений с регулируемым приводом.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1. Казакбаев, В.М. Математическое моделирование трехфазного синхронного реактивного двигателя с оптимальным векторным управлением в среде MATLAB с использованием Simulink и SimPowerSystems / В.М. Казакбаев, В.А. Дмитриевский, В.А. Прахт // Дистанционное и виртуальное обучение. 2014. № 6. С. 47-58 (0,5 п.л. / 0,25 п.л.).

2. Казакбаев, В.М. Измерение активной мощности при импульсном питании электродвигателей / В.М. Казакбаев, Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский, А.С. Поздеев // Промышленная энергетика. 2015. № 7. С. 54-57 (0,5 п.л. / 0,25 п.л.).

3. V. Dmitrievskii, V. Prakht, **V. Kazakbaev**, A. Pozdeev, S. Oshurbekov, “Development of a High Efficient Electric Drive with Synchronous Reluctance Motor”, in Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2015 18th International Conference on, IEEE, Pattaya, Thailand, pp. 876-881, 25-28 Oct. 2015.

4. V. Dmitrievskii, V. Prakht, **V. Kazakbaev**, S. Oshurbekov, I. Sokolov, “Development and experimental study of the high efficient synchronous reluctance motor”, in International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM) 2016, IEEE, Capri, Italy, pp. 407 – 412, 22-24 June 2016.

Публикации в других научных изданиях:

5. Казакбаев, В.М. Расчет энергетических характеристик синхронного реактивного двигателя / В.М. Казакбаев, В.А. Дмитриевский, В.А. Прахт // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: сборник материалов научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ. 2013. С. 100-103 (0,25 п.л. / 0,1 п.л.).

6. Казакбаев, В.М. Техничко-экономическая значимость стандартов, регулирующих энергоэффективность электродвигателей / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский, А.А. Дмитриевский, В.М. Казакбаев // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии «ЭКСИЭ – 03»: сборник докладов III Международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. С. 81-85 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

7. Казакбаев, В.М. Энегоэффективные синхронные реактивные двигатели для насосных, вентиляторных и компрессорных приложений / В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский, А.А. Дмитриевский, В.М. Казакбаев, Н.Р. Сафин // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии (ЭКСИЭ – 03): сборник докладов III Международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. С. 148-151 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

8. Казакбаев, В.М. Расчет рабочих характеристик синхронного реактивного двигателя в приводе насоса / В.М. Казакбаев, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий (АПЭЭТ-2014): сборник научных трудов международной конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 238-243 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

9. Казакбаев, В.М. Техничко-экономическое обоснование применения синхронного реактивного двигателя в регулируемом электроприводе / В.М. Казакбаев, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: сборник научных трудов I Международной научной конференции. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. С. 167-169 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

10. Казакбаев, В.М. Экспериментальная оценка энергоэффективности частотно-регулируемого привода насоса / В.М. Казакбаев, М.О. Боровских, А.В. Нечаев, В.А. Прахт // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: сборник материалов научно-практической конференции с международным участием. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 138-140 (0,25 п.л. / 0,1 п.л.).

11. Казакбаев, В.М. Расширение области применения синхронного реактивного двигателя / В.М. Казакбаев, В.А. Прахт, В.А. Климарев, Н.Р. Сафин // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники

энергии: сборник научных трудов. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 88-91 (0,3 п.л. / 0,15 п.л.).

12. Казакбаев, В.М. Математическое моделирование системы управления трехфазного синхронного реактивного двигателя / В.М. Казакбаев, А.А. Дмитриевский, В.А. Дмитриевский, В.А. Прахт // Электропривод транспорта и промышленности: сборник докладов всероссийской научно-практической конференции. – Хабаровск: ДВГУПС, 2013. С. 74-83 (0,25 п.л. / 0,1 п.л.).

13. Казакбаев, В.М. Разработка энергоэффективного синхронного реактивного двигателя / В.А. Дмитриевский, В.А. Прахт, В.М. Казакбаев, А.С. Поздеев, С.Х. Ошурбеков // Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах: сборник материалов международной научно-технической конференции. – Севастополь: СевНТУ, 2015. С. 26-29 (0,1 п.л. / 0,05 п.л.).

14. Казакбаев, В.М. Экспериментальное сравнение асинхронного и синхронного реактивного электродвигателей / В.А. Дмитриевский, В.А. Прахт, В.М. Казакбаев, А.С. Поздеев, А.Ф. Михалицын, С.Х. Ошурбеков // Электроприводы переменного тока (ЭППТ-2015): Сборник трудов XVI научно-технической конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 19-22 (0,15 п.л. / 0,05 п.л.).

15. Казакбаев, В.М. Разработка синхронного реактивного электропривода / В.А. Дмитриевский, В.А. Прахт, В.М. Казакбаев, А.С. Поздеев, А.Ф. Михалицын, С.Х. Ошурбеков // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: сборник материалов международной научно-технической конференции. – Пермь: ПНИПУ, 2015. С. 89-91 (0,15 п.л. / 0,05 п.л.).