



Бычков Антон Евгеньевич

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С СИНХРОННЫМ
РЕАКТИВНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ**

Специальность 05.09.03. – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Магнитогорск – 2013

Работа выполнена на кафедре “Электропривод и автоматизация промышленных установок” Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Южно-Уральский государственный университет” (национальный исследовательский университет), г. Челябинск.

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент **Григорьев Максим Анатольевич**.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Сарваров Анвар Сабулханович**, заведующий кафедрой “Автоматизированный электропривод и мехатроника” Федерального государственного образования высшего профессионального образования “Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова”, г. Магнитогорск;

кандидат технических наук, доцент **Сандалов Виктор Михайлович**, заведующий кафедрой “Электрооборудование и автоматизация производственных процессов” филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Южно-Уральский государственный университет” (национальный исследовательский университет), г. Златоуст.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Национальный исследовательский **Томский политехнический университет**”, г. Томск.

Защита состоится 13 декабря 2013, в 14 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.111.04 при ФГБОУ ВПО “Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова” по адресу: 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ауд. 227.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО “Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова”.

Автореферат разослан 12 ноября 2013г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ауд. 227, **E-mail:** 9191236713@mail.ru, **факс +7 (351)775-14-16**.

Ученый секретарь диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



К.Э. Одинцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Совершенствование элементной базы (полупроводниковой и микропроцессорной техники) расширяет возможности электроприводов переменного тока. Доля регулируемых электроприводов переменного тока продолжает расти. Между тем, в рамках регулируемых электроприводов переменного тока стали появляться решения, отличающиеся простотой конструкции электромеханического преобразователя, бесконтактностью, высокими перегрузочными способностями и регулировочными показателями.

С другой стороны, с расширением возможностей регулируемых электроприводов переменного тока, повышаются требования и со стороны технологических объектов с тяжелыми и сверхтяжелыми условиями эксплуатации. Так, например, к электроприводам подачи станов холодной прокатки труб предъявляются повышенные требования по перегрузочной способности и быстродействию. Другой пример: к тяговым электродвигателям городского электротранспорта стали предъявлять требования по снижению высоты оси вращения и расширению диапазона регулирования скорости в зоне ослабления поля. Указанные требования не могут быть решены в рамках традиционных электроприводов постоянного и переменного тока.

Одним из решений, отвечающих указанным выше требованиям, является электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения (СРДНВ).

В существующих публикациях по электроприводам с реактивными машинами зарубежных (*A. Vagati, T. Lipo, H. Weh*) и отечественных (Е.В. Кононенко, В.Я. Беспалов, Н.Ф. Ильинский, М.Г. Бычков, Ю.С. Усынин, В.Ф. Козаченко) авторов предложены различные математические модели электропривода. Также проведена оптимизация линейной плотности поверхностного тока, предложены и обоснованы алгоритмы управления электроприводом с СРДНВ, разработаны структуры управления, экспериментально доказаны высокие удельные и регулировочные показатели данного класса электроприводов, указаны возможности экономии активных материалов за счет конструкции электрической машины.

Между тем, вышеназванные публикации не исчерпывают интерес к данному классу электроприводов, в первую очередь это касается разработки систем управления, которые позволят повысить удельные, регулировочные и энергетические характеристики системы без удорожания конструкции электрической машины, обеспечивающие высокие регулировочные (расширение диапазона до 7:1) и перегрузочные показатели по моменту ($M > 4M_H$).

Отмеченные обстоятельства позволяют заключить, что данная работа является актуальной.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Гранта Президента РФ (Соглашение № 16.120.11.6780-МК от 01 февраля 2012. «Разработка концепции развития энергосберегающих регулируемых электроприводов с параметрическим (дроссельным) регулированием традиционных и новых типов элек-

трических машин») и ФЦП «Кадры» по научной проблеме «Энергосберегающие тяговые электроприводы электровозов» (Соглашение № 14.132.21.1754 от 01.10.2012).

Цель работы. Разработка системы управления электроприводом с СРДНВ, обеспечивающей улучшенные массогабаритные, перегрузочные и регулировочные показатели для механизмов с тяжелыми условиями эксплуатации за счет учета совместной работы полупроводникового преобразователя и двигателя.

Достижение поставленной цели потребовало в научной работе решения следующих научных задач:

- создание математической модели электропривода;
- изучение особенностей работы силовой части электропривода с СРДНВ как объекта регулирования при раздельном и независимом воздействии на токи возбуждения и якоря;
- повышение удельных показателей электропривода за счет совершенствования его системы управления;
- синтез структур управления электроприводов с СРДНВ;
- разработка инженерных методик расчета параметров системы управления электропривода;
- экспериментальное исследование свойств разработанных систем управления для СРДНВ.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались основные положения теории электромеханического преобразования энергии, теории автоматического управления, практические аспекты силовой и информационной электроники, методы математического моделирования систем на ЭВМ, методы экспериментального исследования.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается инженерной точностью совпадения основных теоретических результатов и экспериментальных данных, полученных на лабораторном образце, а также аргументированностью предпосылок к решению задач исследования и корректным изложением материала.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель электропривода с СРДНВ, близкая по структуре обращенной машине постоянного тока;
2. Структура и алгоритмы управления электроприводом с СРДНВ, обеспечивающие улучшенные перегрузочные моменты и минимизирующие пульсации электромагнитного момента;
3. Методика синтеза структуры управления электроприводом с СРДНВ во второй зоне регулирования скорости.

Научная новизна и научное значение работы состоит в следующем:

1. Предложена математическая модель электропривода с СРДНВ, которая по своей структуре близка обращенной машине постоянного тока, отличающаяся учетом дискретного режима работы машины. Указанный подход позволил дать физическое обоснование процессов в электроприводе и в дальнейшем выполнять синтез системы управления.

2. Предложены структуры и алгоритмы управления электроприводом с СРДНВ, обеспечивающие улучшенные перегрузочные моменты, превышающие номинальный момент в 4 – 5 раз и минимизирующие пульсации электромагнитного момента (в 2 – 3 раза). Достигается это за счет раздельного управления токами возбуждения и якоря. Структура управления, реализующая высокие удельные показатели, защищена патентом РФ Пат. 2408972.

3. Предложена методика синтеза структур управления электроприводом с СРДНВ в зоне ослабления поля, состоящая в том, что на начальном этапе настраиваются частотными методами независимо m (по числу фаз) контуров регулирования фазных токов на максимальное быстродействие (до 1000-2000 рад/с), на следующем этапе электропривод аппроксимируется системой с двойной модуляцией сигнала управления, на заключительном этапе вносится коррекция в сигнал управления, пропорциональная скорости электропривода. Разработанная методика позволила расширить диапазон регулирования скорости в зоне ослабления поля в 1,5 – 2 раза.

Практическое значение работы заключается в следующем:

- найдены рациональные структуры и алгоритмы управления, которые расширили диапазон перегрузок по моменту (от 5 до 10 крат), что позволяет применять электропривод для механизма подачи стана холодной прокатки труб, где актуальны большие перегрузки по моменту при срыве трубы с оправки;

- предложены и реализованы системы управления электроприводом с СРДНВ с массивным ротором, обеспечивающие улучшенные массогабаритные показатели по сравнению с классической синхронной электрической машиной. Применение электропривода СРДНВ с “жестким” (массивным) ротором позволяет использовать удлиненный ротор с пониженной высотой оси вращения для тяговых механизмов городского электротранспорта с пониженным уровнем пола;

- разработаны и экспериментально обоснованы методы расширения полосы равномерного пропускания частот контура регулирования тока комплекса «вентильный преобразователь – статорные цепи СРДНВ», что позволяет отказаться в ряде электроприводов от механических мультипликаторов;

- разработан и реализован лабораторный стенд установки, позволяющий исследовать статические и динамические режимы работы СРДНВ.

Внедрение. В учебном процессе материалы диссертации используются в курсах «Системы управления электроприводов», «Экспериментальное исследование электроприводов», на кафедре электропривода и автоматизации промышленных установок Южно-Уральского государственного университета.

В производственном процессе материалы диссертации используются в ООО НТЦ “Приводная техника” (г. Челябинск) и на ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» (г. Челябинск).

Реализация выводов и рекомендаций работы. Разработанные структурные и функциональные схемы, а также лабораторная установка электропривода с СРДНВ приняты для использования на кафедре электропривода и

автоматизации промышленных установок Южно-Уральского государственного университета.

Апробация работы. В полном объеме работа докладывалась и обсуждалась на расширенных заседаниях кафедр:

– “Электропривод и автоматизация промышленных установок” Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования *Южно-Уральского государственного университета*, г. Челябинск;

– “Автоматизированный электропривод” Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Национальный исследовательский университет “МЭИ”, г. Москва;

– “Автоматизированный электропривод и мехатроника” Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования “*Магнитогорский государственный технический университет* им. Г.И. Носова”, г. Магнитогорск.

– “Электропривод и электрооборудование” Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования “*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*”, г. Томск.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах, в том числе на: XIII Международной конференции по электромеханике, электротехнологиям, электротехническим материалам и компонентам, (г. Алушта, 2010 г.); VI Международной, XVII Всероссийской конференции по автоматизированному электроприводу (г. Тула, 2010 г.); VII Международной и XVIII Всероссийской конференции по автоматизированному электроприводу (г. Иваново, 2012 г.); Всемирном конгрессе в Детройте (*World Congress & Exhibition, Detroit, MI*), США, 2010 и 2011 г.; XV Научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» ЭППТ, (г. Екатеринбург, 2012 г.); Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии», (г. Иваново, 2011 и 2012 г.); Наука ЮУрГУ (ежегодной научной конференции Южно-Уральского государственного университета, Челябинск), 2009, 2010, 2011, 2012 и 2013 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, в том числе 10 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК, 4 патента РФ и 6 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 125 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка, 10 таблиц, список используемой литературы из 137 наименований.

Автор выражает свою благодарность научному консультанту профессору Усынину Юрию Семеновичу за неоценимую помощь в подготовке работы и полезные советы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы, определены цели, задачи, методы исследования, научная новизна и практическая ценность, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ требований технологического процесса к ряду объектов. Так, давно уже не “на бумаге” стали актуальными требования по созданию трамвая со сверхнизким полом (с высотой 110 мм). Решение поставленной задачи возможно за счет применения электроприводов, имеющих жесткий в осевом направлении ротор. К некоторым тяговым механизмам, питающимся от дизель-генераторных установок, предъявляются требования по расширению диапазона регулирования в зоне ослабления поля до 10:1. Существующие асинхронные электроприводы допускают диапазон 2,5:1.

К механизмам возвратно-поворотной группы станов холодной прокатки труб предъявляются не менее жесткие требования: электропривод позиционирует заготовку массой более 20 т, причем время позиционирования не превышает 100 мс. При срыве трубы с оправки электропривод должен кратковременно развивать момент, больший $4M_H$. Серийные электроприводы постоянного тока и асинхронные электроприводы допускают небольшие кратковременные перегрузки $(2,5 - 3)M_H$.

Обеспечение жестких требований технологического процесса возможно только за счет комплексного подхода к проектированию современного электропривода и учета особенности совместной работы полупроводникового преобразователя и двигателя. В литературных источниках специалисты-электротехники критически оценивают возможности серийных электроприводов и обращается внимание на те классы электроприводов, которые ранее считались малоперспективными, в частности, на электроприводы с синхронными реактивными двигателями (СРД). Классический синхронный реактивный двигатель, который питается от трехфазной сети переменного тока, развивает мощность, не превышающую 40% мощности равного ему по габаритам асинхронного двигателя, и имеет коэффициент мощности, который не превышает 0,5. Низкие удельные показатели электродвигателя объясняются двумя причинами: 1) разомкнутым по положению принципом управления, поэтому требуется большой запас по углу нагрузки; 2) малым значением отношения L_d/L_q в массивном роторе.

Для улучшения удельных показателей синхронных реактивных машин применяется усложненная форма ротора. Профессор Кононенко Е.В. за счет оптимизации геометрических размеров ротора приблизил показатели синхронных реактивных машин к асинхронным двигателям.

Следующим этапом развития синхронных реактивных электроприводов стали работы профессора А. Vagati. За счет оптимизации конструкции ротора и, управления электроприводом в функции положения ротора, удалось в габаритах асинхронного двигателя улучшить удельные показатели синхронных реактивных электроприводов по сравнению с асинхронными на 15-20%. Полученное преимущество актуально для механизмов, работающих в частых

пуско-тормозных режимах, для которых необходимо иметь значение показателя M_n/J максимальным.

В начале 2010 года компания *ABB* предложила вариант синхронного реактивного электропривода с *DTC (Direct Torque Control)* управлением. Анализ массогабаритных показателей показал, что в габаритах асинхронного двигателя удается получить электропривод, который развивает электромагнитный момент на 10-15% выше (рис. 1), при

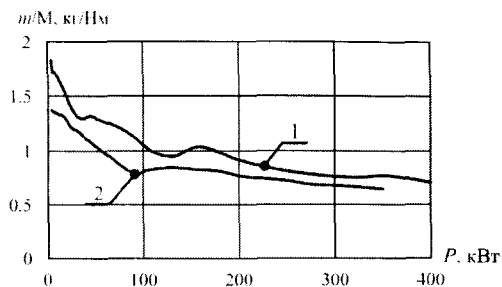


Рис. 1. Удельные показатели электроприводов:
1 – асинхронного, 2 – реактивного ABB

этом полоса равномерного пропускания частот в контуре регулирования момента превышает частоту среза в асинхронном электроприводе в 1,5-2 раза.

В конце 20-го века профессор *H. Weh* предложил вариант многофазного СРД, имеющего обмотку с полным шагом и питаемого не синусоидальным, а прямоугольным током. При этом фазные обмотки статора над полюсом ротора двигателя создают поле реакции якоря, а обмотки над межполюсным промежутком – поле возбуждения. Такой тип электрических машин в зарубежной технической литературе называют *Field regulated reluctance machine – FRRM* (синхронный реактивный двигатель независимого возбуждения – СРДНВ). Улучшенные удельные и регулировочные показатели достигаются за счет применения специальных законов управления фазными токами. Или же применением ротора с немагнитными вставками. При этом функции статорных обмоток в процессе работы меняются. За один временной период обмотка сначала выполняет роль возбуждения, затем функцию якоря.

Для оценки предельных возможностей электроприводов с классическим СРД (питаемым от трехфазного источника) и с СРДНВ были приняты следующие допущения: электроприводы питаются от идеальных источников тока с бесконечной полосой равномерного пропускания; в машинах отсутствуют пульсации электромагнитного момента. В результате сопоставления установлено, что электропривод с СРДНВ развивает больший электромагнитный момент, чем классический реактивный двигатель на 10-15%, что вполне согласуется с результатами исследований других авторов.

В результате анализа литературных источников установлено, что в электроприводах с СРДНВ за счет комплексного подхода к проектированию можно добиться высоких удельных показателей с простым “жестким” ротором. В связи с изложенным, решение задач синтеза системы управления, обеспечивающей улучшенные удельные и регулировочные показатели удобнее производить в следующей последовательности: на основании экспериментальных исследований на реальном образце и теоретических исследований на модели электропривода, определить резервы по улучшению удельных показателей, расширить диапазон регулирования скорости, особенно в зоне

ослабления поля, реализовать разработанные законы управления на реальном лабораторном образце электропривода.

Во второй главе была разработана математическая модель электропривода с СРДНВ. Выбор допущений и синтез модели включали следующие этапы:

- на начальном этапе изучалась картина магнитных полей в зазоре СРДНВ на холостом ходу и под нагрузкой. Анализ кривых магнитной индукции показал, что электропривод с СРДНВ по своей природе близок к электроприводу с обращенной машиной постоянного тока, а следовательно, может описываться аналогичными уравнениями;

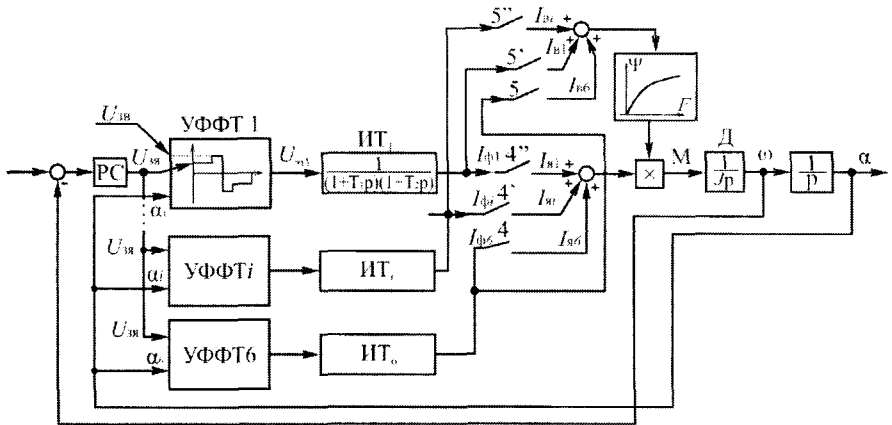


Рис. 2. Математическая модель электропривода с СРДНВ

- в отличие от электропривода постоянного тока, количество фаз в СРДНВ ограничено, и коммутация фазных токов выполняется полупроводниковым преобразователем, поэтому потребовалось определить зону полосы равномерного пропускания частот контуров фазных токов, в которой можно пренебрегать электро-движущей силой (ЭДС) от взаимных- и самоиндукций. Анализ кривых собственных и взаимных индукций, полученных для машин малых мощностей (до 5 кВт) экспериментально, а для машин большой мощности – расчетным способом, показал, что охват каждой фазы по току позволяет аппроксимировать частотную характеристику каждого канала (фазы) последовательным соединением двух апериодических звеньев первого порядка с постоянными времени T_1 и T_2 (рис. 2). Данная структура справедлива только в диапазоне частот от 0 до частоты среза контура тока. Физический смысл постоянной времени T_1 – эквивалентная электромагнитная постоянная времени, которая получается в контуре регулирования за счет работы П-канала регулятора тока. Постоянной времени T_2 приближенно учитываются дискретные свойства полупроводникового преобразователя, работающего в режиме широтно-импульсной модуляции;

- задания на фазные токи $U_{\text{ст}}$ приходят из узла формирования фазных токов (УФФТ) и подаются на входы соответствующих источников тока;
- ключи 4 – 4'' и 5 – 5'' коммутируют в функции положения ротора электродвигателя токи якоря и возбуждения к сумматорам структурной схемы и тем самым учитывают дискретный характер работы машины;
- электромагнитный момент рассматривается как результат произведения токов якоря и возбуждения;
- звеном Д учитывается механическая инерция двигателя (или двигателя и рабочего органа);
- внешний контур регулирования скорости настраивается регулятором скорости, на входе которого алгебраически суммируются сигнал задания на скорость и сигнал обратной связи по скорости.

На рис. 3 даны осциллограммы фазных токов в функции времени. При скорости вращения вала двигателя ω_n осциллограмма тока якоря совпадает с выходом УФФТ $U_{\text{ст}}$. Время T_2 будет зависеть от настройки быстродействия контура регулирования фазного тока и лежит в диапазоне от 5 до 30 мкс.

На рис. 4 даны экспериментальная и расчетная моментные характеристики электропривода. Из таб. 1 следует, что предложенная математическая модель адекватно описывает процессы в электроприводе в диапазоне нагрузок от 0 до $2M_n$. При нагрузках больших $4M_n$ наблюдается значительное расхождение расчетной и экспериментальной кривых. Это обусловлено увеличением доли потоков выпучивания в межполюсном промежутке машины. Уточнить характеристику электропривода в зоне перегрузок при $M > 4M_n$ можно, если учесть методом конечных

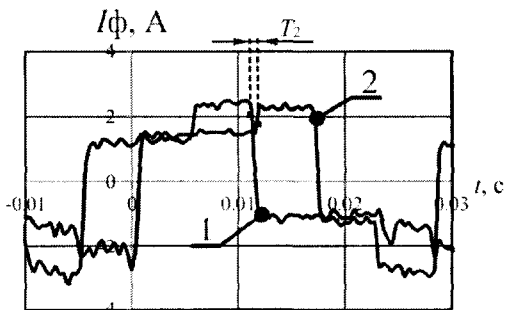


Рис. 3. Экспериментальные осциллограммы токов статора СРДНВ: 1 – первая фаза; 2 – третья фаза

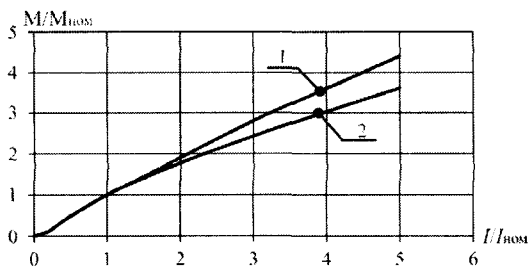


Рис. 4. Расчетная (1) и экспериментальная (2) зависимости электромагнитного момента от тока

элементов распределенные параметры магнитной системы электрической машины. В представленной работе эта задача не решалась.

Таблица 1
Расчетные и экспериментальные значения фазных токов и моментов СРДНВ

Параметр	Кратность перегрузки			
	1	2	3	3,5
$I_{расч}$ (отн.)	1,03	2,07	3,18	3,85
$I_{эксп}$ (отн.)	1,04	2,27	3,92	4,79
M (отн.)	1	2	3	3,5
Ошибка %	0,9	8,8	18,8	19,6

На моментной характеристике электропривода (рис. 4) можно указать ряд участков: в зоне малых нагрузок, когда магнитная система двигателя не насыщена, зависимость момента носит характер, близкий к квадратичной. При нагрузках выше номинального значения, когда магнитная система двигателя насыщается, эта зависимость близка к линейной. Полезно дать физическое обоснование этому факту: в зоне перегрузок наблюдается определенная аналогия с двигателями постоянного тока последовательного возбуждения, когда размагничивающее влияние реакции якоря компенсируется эффектом последовательного возбуждения.

На следующем этапе исследований рассматриваются способы воздействия на систему управления электропривода с целью получения более высоких удельных показателей работы электропривода и снижения пульсаций электромагнитного момента без усложнения конструкции электрической машины. Наличие неучтенных физических особенностей элементов электропривода, а также различная физическая природа изучаемых процессов привели к тому, что предпочтение было отдано экспериментальным методикам исследования.

Было выполнено сравнение показателей электропривода с СРДНВ для трех форм фазного тока (прямоугольной, синусоидальной и трехступенчатой) и для разных вариантов конструкции ротора (массивного и с немагнитными прокладками). Эксперимент показал, что наибольший электромагнитный момент достигается при прямоугольной форме тока в обмотках статора СРДНВ, которая превосходит по этому показателю синусоидальную и трехступенчатую приблизительно на 15%.

Экспериментально было установлено, что при питании обмоток статора СРДНВ прямоугольным током развиваемый электромагнитный момент увеличивается примерно на 10%, при питании же обмоток статора синусоидальным током – снижается на 5%. Переключение фаз при работе электропривода с СРДНВ приводит к возникновению пульсаций электромагнитного момента, которые обычно снижали увеличением числа фаз электрической машины. Можно снизить амплитуду пульсаций, воздействуя на систему управления без изменения конструкции машины. Была предложена гибкая обратная связь по току, которая искусственно завышает ток перед переключением, сглажи-

вая кривую электромагнитного момента (структура обратной связи показана на рис. 5, на рисунке обозначены: РТ – регулятор тока, ДТ – датчик тока, РС – регулятор скорости, КУ – корректирующее устройство). Рассмотрена зависимость амплитуды первой гармоники пульсаций A от времени запаздывания

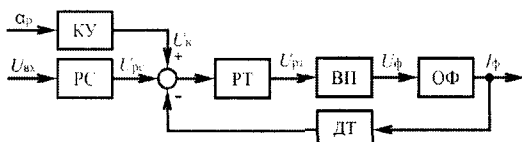


Рис. 5. Структура гибкой положительной обратной связи по току

T , которое равняется времени программной задержки системы управления между началом спада тока в одной фазе и началом нарастания тока в другой фазе, что проиллюстрировано на рис. 3 на

примере экспериментальных осциллограмм тока.

Сопоставлялись три варианта работы электропривода: в первом варианте корректирующая связь отсутствовала (рис.6, кривая 1), во втором случае корректирующая связь воздействовала только на отключаемый период тока (спадающий фронт) (рис.6, кривая 2), в третьем случае корректирующая связь воздействовала на нарастающий фронт и на ниспадающий фронт (рис.6, кривая 3). При времени переключения до 5 мс амплитуда пульсаций момента незначительна, но при времени переключения, равном 50 мс, значение пульсаций достигает ощутимого значения и может привести к некачественной работе электропривода.

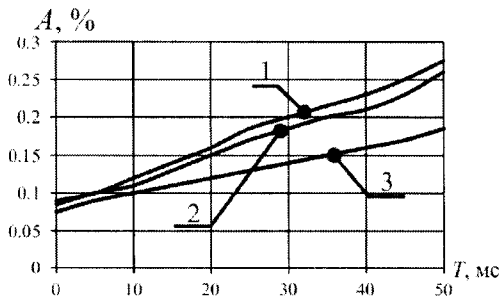


Рис. 6. Зависимость амплитуды пульсации момента на валу от времени запаздывания тока

В третьей главе приведены результаты синтеза системы управления электроприводом с СРДНВ с использованием аппарата экспериментальных частотных характеристик. В работе доказана возможность реализации схем с СРДНВ, структура которых аналогична традиционным структурам электроприводов постоянного тока: двухконтурные с обратными связями по скорости и моменту электропривода, трехконтурные с обратными связями по скорости, моменту.

Статические характеристики электроприводов с СРДНВ в

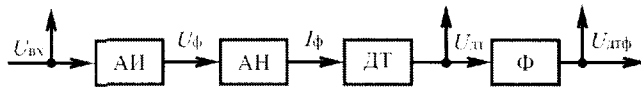


Рис. 7. К исследованию ЛЧХ вентильных преобразователей

этом случае подобны соответствующим характеристикам электроприводов постоянного тока с аналогичными структурными схемами. Динамические свойства вентильного преобразователя являются определяющими при рас-

смотрении свойств контура регулирования тока(КРТ). Именно прогресс в области преобразовательной техники позволил значительно улучшить динамику КРТ. Было произведено сравнение характеристик индивидуальных источников тока и мостовых инверторов (схема эксперимента представлена на рис. 7) результаты представлены на рис. 8. На рис. 7 обозначены: АИ – автономный инвертор, АН - активная нагрузка, ДТ – датчик тока, Ф – фильтр.

По виду характеристик можно сказать, что применение индивидуальных источников тока фаз позволяет значительно раздвинуть полосу равномерного пропускания частот КРТ.

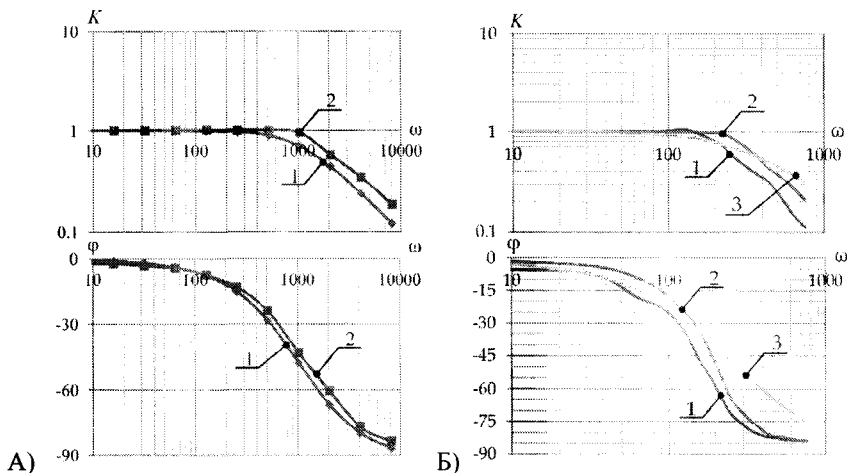


Рис. 8. Экспериментальные частотные характеристики: А – индивидуального источника тока: 1 – аппроксимированная, 2 – экспериментальная; Б – автономного инвертора: 1,2 – экспериментальные, 3 – аппроксимированная

Экспериментальное исследование этих частотных характеристик позволило уточнить математическую модель КРТ электропривода, содержащего в своем составе преобразователь частоты с ШИМ-регулированием напряжения на обмотках статора. Предложенная экспериментальная методика определения частотных характеристик КРТ, а также полученные экспериментальные частотные характеристики указывают на возможность расширения полосы равномерного пропускания частот исследуемых КРТ.

Экспериментальное исследование КРТ СРДНВ показало, что данная система на структурной схеме может быть аппроксимирована в диапазоне частот от 0 до 10000 рад/с либо колебательным звеном второго порядка, либо двумя последовательно соединенными инерционными звеньями первого порядка:

$$W_{\text{КРТ}} = \frac{1}{(1 + T_1 p) \cdot (1 + T_2 p)}$$

где первый множитель с постоянной времени T_1 аппроксимирует динамические свойства обмотки статора СРДНВ (время нарастания тока в обмотке

от нулевого значения до номинального под воздействием номинального напряжения), а второй множитель с постоянной T_2 – динамические свойства вентильного преобразователя (время нарастания выходного напряжения с нулевого значения до номинально при номинальном задании на входе).

Для исследования контура регулирования момента СРДНВ была принята модель системы с двойной амплитудной модуляцией. Проведено моделирование на ЭВМ и экспериментальное исследование частотных характеристик контуров регулирования момента и тока СРДНВ, которое подтвердило, что в частотно-регулируемом электроприводе переменного тока не удастся получить скорость вращения выше полосы пропускания частот контура регулирования тока.

На рис. 9 показана схема экспериментального исследования частотных характеристик. На рис. 9 обозначены элементы: Вектор – источник задающего синусоидального сигнала, УФФТ – узел формирования фазных токов, РТ – регулятор тока, АИ – автономный инвертор, ДТ – датчик тока, СД – синхронный двигатель, ДПР – датчик положения ротора, ПЛК – программируемый логический контроллер, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь.

Были рассмотрены возможности применения для электропривода с СРДНВ унифицированных систем автоматического регулирования. Здесь наиболее актуальными следует признать по аналогии с электроприводом постоянного тока следующие структуры: двухконтурная система подчиненного регулирования (с внутренним контуром тока и внешним контуром скорости); структура с двухзонным регулированием скорости, также выполненная по подчиненному принципу с обратными связями по току и скорости в основном канале и контурами по току возбуждения и напряжению на якоре в канале ослабления поля; структура, актуальная для автономных электроприводов и для некоторых производственных механизмов (моталки станов холодной прокатки), данные структуры содержат ограничение по максимальному моменту или по максимальной мощности электропривода. Экспериментальное исследование, а также моделирование данных структур показало, что они актуальны для данного класса электроприводов.

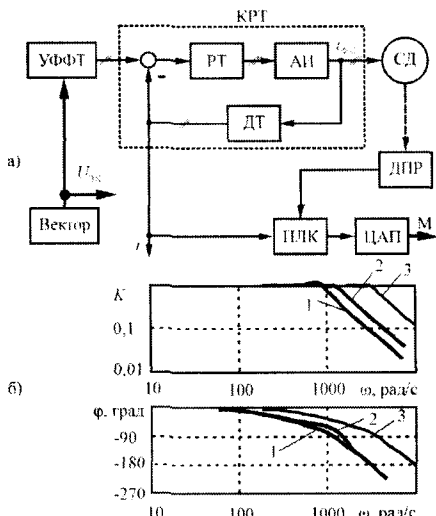


Рис. 9. Функциональная схема опыта (а) и экспериментальные ЛЧХ КРТ и КРМ (б): 1 – КРМ СД; 2 – КРТ СД; 3 – КРТ СРДНВ

Анализ кривых, представленных на рис. 9, позволяет утверждать, что контур регулирования момента можно рассматривать как линейную систему с амплитудной модуляцией. Пользуясь принципом разделения движений, можно независимо рассматривать процессы в фазных контурах регулирования тока и контуре регулирования момента. Далее рассмотрим особенности синтеза системы управления электроприводом с двухзонным регулированием скорости (рис. 10).

В рассматриваемой структуре (рис. 10 а), желаемое значение скорости n_3 вращения электропривода поддерживается с помощью контура регулирования скорости, который настраивается на заданные показатели качества регулятором скорости РС. Допустимое значение тока фазных обмоток двигателя (и электромагнитного момента) ограничивается максимальным напряжением на выходе РС, которое устанавливается блоком ограничения БО, как в обычной схеме подчиненного регулирования. При напряжениях на статоре двигателя, меньших номинального ($U < U_H$), регулятор напряжения РН насыщен, а ток возбуждения двигателя определяется уставкой блока ограничения БО2 и максимален. В идеальном электроприводе предельная механическая характеристика электропривода совпадает в этом случае с аналогичной характеристикой в электроприводе постоянного тока с двухзонным регулированием.

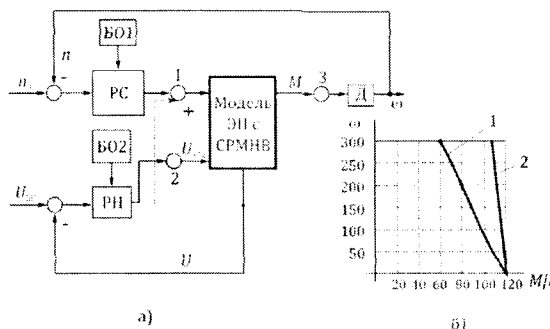


Рис.10. Структура управления электроприводом в зоне ослабления поля

На рис. 10 б даны зависимости отношения момента двигателя к току в функции скорости для случая, когда при уставках задания на скорость больше основной скорости поток в электрической машине не ослаблялся. При питании двигателя от идеального источника тока, имеющего бесконечно большую полосу равномерного пропускания частот, эта зависимость должна проходить параллельно оси скорости. Однако, на реальном графике отношение момента к току при увеличении скорости снижается (кривая 1). Объясняется это статической ошибкой, которая связана с ЭДС вращения: в момент переключения знака тока обмотка фазы двигателя находилась над межполюсным промежутком и ЭДС вращения была равна нулю, при движении ротора обмотка попадает на полюсный промежуток, в ней наводится ЭДС. Введение интегрального канала в регуляторе тока не решает эту проблему, так как зона работы И-канала лежит намного левее частоты среза. Для решения поставленной задачи предложено ввести коррекцию по ЭДС вращения. Корректи-

рующий сигнал по ЭДС вращения подается на узел 1 (рис. 10 а). На рис. 10 б (кривая 2) показана зависимость отношения момента к току в функции скорости двигателя, при введенной коррекции по ЭДС вращения.

Высокая степень совпадения экспериментальных и расчетных результатов позволяет заключить, что традиционные методики исследования с помощью экспериментальных частотных характеристик также подходят и для исследования электроприводов переменного тока.

В четвертой главе дано описание экспериментальной лабораторной установки, спроектированной автором, для проверки основных теоретических положений. Приведена функциональная схема лабораторной установки с электроприводом с СРДНВ на основе индивидуальных источников тока фаз.

Из рис. 11 видно, что СРДНВ получает питание от индивидуальных источников тока фаз $UZ1 - UZ6$, которые управляются с помощью УФФТ в функции положения ротора, измеряемого датчиком положения BQ . К валу СРДНВ гибкой муфтой подсоединен вал нагрузочной машины – двигателя постоянного тока, питающегося от реверсивного тиристорного преобразователя *Mentor II*. Описана работа системы управления, построенной на микроконтроллере *Atmega 8535*. Продемонстрированы особенности проведения экспериментов с помощью прибора «Вектор – 2М» и *Fluke 192*. На рис. 11 представлена функциональная схема разработанной установки. Создание экспериментального макета электропривода с СРДНВ позволило взять за основу диссертационного исследования экспериментальные методики, подобный подход наиболее це-

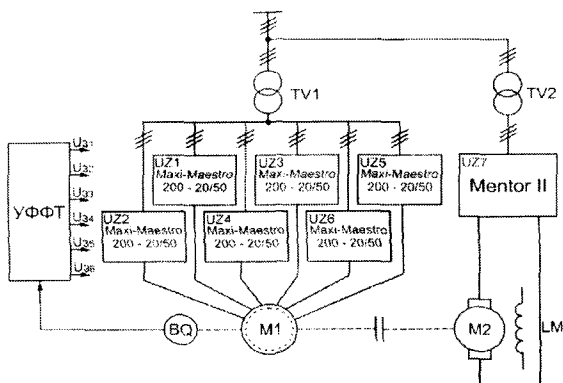


Рис.11. Функциональная схема лабораторного макета электропривода

лестно. Описана работа системы управления, построенной на микроконтроллере *Atmega 8535*. Продемонстрированы особенности проведения экспериментов с помощью прибора «Вектор – 2М» и *Fluke 192*. На рис. 11 представлена функциональная схема разработанной установки. Создание экспериментального макета электропривода с СРДНВ позволило взять за основу диссертационного исследования экспериментальные методики, подобный подход наиболее це-

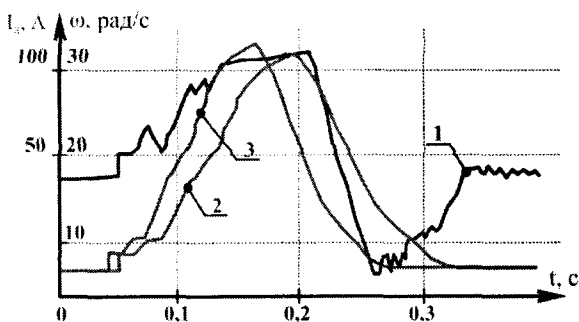


Рис.12. Осциллограммы стана ХПТ: 1 – фазного тока, 2 – скорости без внедренных алгоритмов управления, 3 – скорости после внедренных алгоритмов управления

лестно. Описана работа системы управления, построенной на микроконтроллере *Atmega 8535*. Продемонстрированы особенности проведения экспериментов с помощью прибора «Вектор – 2М» и *Fluke 192*. На рис. 11 представлена функциональная схема разработанной установки. Создание экспериментального макета электропривода с СРДНВ позволило взять за основу диссертационного исследования экспериментальные методики, подобный подход наиболее це-

нен для исследования малоизученного объекта для выявления неучтенных физических особенностей работы.

На рис. 12 приведены осциллограммы фазного тока и скорости электропривода подачи стана ХПТ 450 Цеха №5 ОАО ЧТПЗ (г. Челябинск) при штатной схеме управления (кривые 1 и 2 на рисунке) и при работе с предложенными законами управления (кривая 3 на рисунке). По результатам обработки более 40 осциллограмм за 6 месяцев эксплуатации системы было установлено, что производительность системы увеличилась на 20%, а ожидаемый экономический эффект от внедрения составит более 410 тыс. рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача – улучшение удельных и эксплуатационных показателей работы электроприводов с СРДНВ путем совершенствования системы управления, что достигнуто за счет учета совместной работы вентильного преобразователя и электродвигателя в едином комплексе. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволяют отметить следующие основные результаты и сделать выводы:

1. Предложена математическая модель электропривода с СРДНВ, которая по своей структуре близка обращенной машине постоянного тока, отличающаяся учетом дискретного режима работы машины. Математическая модель разрабатывалась без учета распределенного характера параметров магнитной системы. Результаты исследований на математической и физических моделях показали, что в диапазоне изменения нагрузок до двух номинальных моментов, предложенная математическая модель дает приемлемые для практических расчетов результаты.

2. Установлено, что прямоугольная форма тока фазы СРДНВ превосходит по критерию максимального развиваемого электромагнитного момента синусоидальную и трехступенчатую формы тока фазы приблизительно на 15%. Применение немагнитных прокладок, ориентированных вдоль продольной магнитной оси ротора, оказывает двойственный эффект: с одной стороны, концентрирует магнитный поток вдоль продольной магнитной оси ротора, с другой – неизбежно уменьшает сечение магнитопровода вдоль этой оси.

3. Предложены структуры и алгоритмы управления электроприводом с СРДНВ, обеспечивающие улучшенные перегрузочные моменты, превышающие номинальный момент в 4-5 раз и минимизирующие пульсации электромагнитного момента (в 2-3 раза). Показано, что амплитуда пульсаций электромагнитного момента СРДНВ зависит от времени спадания и нарастания тока нагрузки между соседними фазами, а также времени программной задержки элементов системы управления.

4. Предложена методика синтеза структур управления электроприводом с СРДНВ в зоне ослабления поля. Моделирование на ЭВМ и экспериментальные исследования показали, что в частотнорегулируемом электроприводе переменного тока не удастся получить скорость вращения выше полосы пропускания частот контура регулирования тока статора. Достоинства СРДНВ

(высокая механическая прочность ротора, низкая электромагнитная инерционность цепей статора) и улучшенные динамические характеристики вентиляльных преобразователей, питающих статорные цепи, дают возможность существенно расширить диапазон частот регулируемых напряжений, питающих статорные цепи, что, в свою очередь, позволяет отказаться от механических мультипликаторов в быстроходных (до 6 – 9 тысяч об/мин) турбомеханизмах.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

Статьи, входящие в издания, рекомендованные ВАК

1. **Бычков, А.Е.** Оптимизация числа фаз в энергосберегающих регулируемых электроприводах переменного тока / А.Е. Бычков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2010. – Вып. 14. – №32(208). – С. 46 – 51.
2. **Бычков, А.Е.** Оптимизация новых типов электромеханических преобразователей в электротехнических комплексах / А.Е. Бычков, Д.И. Кашаев, Т.Т. Москов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2011. – Вып.15. – №15(232). – С.62 – 67.
3. Пульсации электромагнитного момента в электроприводе с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения/ А.Н. Горожанкин, **А.Е. Бычков**, Т.А. Козина и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2013. – Вып.13. – №1 – С.103 – 111.
4. Тяговый электропривод активного прицепа трубовоза / Ю.С. Усынин, А.Н. Шишков, **А.Е. Бычков** и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2013. – Вып.13. – №1 – С.137 – 143.
5. Григорьев, М.А. Линейная плотность поверхностного тока в энергосберегающих электроприводах с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев, **А.Е. Бычков** // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2010. – Вып. 14. – №32(208). – С. 46 – 51.
6. Математическая модель электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / С.П. Гладышев, **А.Е. Бычков**, А.М. Журавлев и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2012. – Вып. 18. – №37(208). – С. 34 – 38.
7. Потери в регулируемых электроприводах при разных законах управления / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Н. Горожанкин, **А.Е. Бычков** // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2010. – Вып. 13. – № 14(190). – С. 47 – 51.
8. Развитие частотных методов синтеза электроприводов с синхронными машинами / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, **А.Е. Бычков** и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2011. – Вып.16. – №34(251). – С.21 – 27.

9. Новые высокомоментные энергосберегающие электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Н. Горожанкин, **А.Е. Бычков** // Известия Тульского государственного университета (Технические науки) – Издательство ТулГУ, 2010. – Вып. 3, ч. 4. – С.71 – 76.

10. Энергосбережение в электроприводах тягодутьевых механизмов многосвязных объектов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, **А.Е. Бычков** и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2011. – Вып.15. – №15(232). – С.52 – 62.

Патенты и свидетельства РФ

11. Пат. 2408972 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 27/04, Н 02 Р 25/08, Н 02 Р 19/10. Электропривод с синхронной реактивной машиной и способ управления и / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, А.Н. Шишков, **Бычков А.Е.**, Валов А.В. – №2009148381/07(071468) заявл. 24.12.2009.; опубл. 10.01.2011, Бюл. №1.

12. Пат. 2408967 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/10, Н 02 К 19/24, Н 02 К 29/03. Синхронная реактивная машина / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, А.Н. Шишков, **А.Е. Бычков**, А.В. Валов – №2009146993/07(066964) заявл. 17.12.2009.; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.

13. Пат. 2422972 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/10, Н 02 К 19/24, Н 02 К 29/03. Синхронная реактивная машина / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, А.Н. Шишков, **А.Е. Бычков**, А.В. Валов – №2009146987/07(066958) заявл. 17.12.2009.; опубл. 27.06.2011, Бюл. №18.

14. Пат. 2408973 Российская Федерация, МПК Н 02Р 27/05. Асинхронный электропривод с фазным ротором / Ю.С. Усынин, А.В. Валов, Т.А. Козина, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, А.Н. Шишков, **А.Е. Бычков** – №2009148035/07(070970) заявл. 23.12.2009.; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011612473. Расчет частотных характеристик звеньев и систем с амплитудной модуляцией / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, **А.Е. Бычков**, А.Н. Шишков, Т.Т. Москов – Заявка №2011610566, пост. 1.02.2011; зарег. 24.03.2011.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011617294. Программа расчета параметров новых типов электрических машин / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, **А.Е. Бычков**, А.Н. Шишков, Е.В. Белоусов – Заявка №2011615448, пост. 21.07.2011; зарег. 19.09.2011.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011617185. Программа расчета мгновенных значений фазных токов комплекса «Вентильный преобразователь – двигатель» / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, **А.Е. Бычков**, А.Н. Шишков, А.Н. Горожанкин, Е.В. Белоусов – Заявка №2011615634, пост. 21.07.2011; зарег. 19.09.2011.

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012611914. Программа расчета электрических потерь в вентильном преобразователе / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, **А.Е. Бычков**, А.Н. Шишков, А.Н. Горожанкин, Е.В. Белоусов – Заявка №2011619898, пост. 21.12.2011; зарег. 20.02.2012.

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012660100. Программа расчета статических характеристик синхронной реактивной машины независимого возбуждения / Е.В. Белоусов, Т.А. Козина, **А.Е. Бычков**, А.М. Журавлев – Заявка №2012618128, пост. 27.09.2012; зарег. 9.11.2012.

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012660102. Программа расчета параметров системы управления синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Е.В. Белоусов, Т.А. Козина, **А.Е. Бычков**, А.М. Журавлев – Заявка №2012618130, пост. 27.09.2012; зарег. 9.11.2012.

В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат следующие научные результаты: разработка алгоритмов увеличения удельных показателей электропривода [2, 5, 6], разработка алгоритма подавления пульсаций электромагнитного момента [3], разработка математических и экспериментальных моделей [4, 7-10].