

На правах рукописи



ПЕТУШКОВ МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Магнитогорск - 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» на кафедре электроники и микроэлектроники

Научный консультант:

доктор технических наук,
профессор Сарваров Анвар Сабулханович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, доцент Завьялов Валерий Михайлович, директор энергетического института Национальный исследовательский Томский политехнический университет

доктор технических наук, доцент Макаров Валерий Геннадьевич, зав. кафедрой электропривода и электротехники ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

доктор технических наук, профессор Мешеряков Виктор Николаевич, зав. кафедрой электропривода, ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО Оренбургский государственный университет, г.Оренбург

Защита диссертации состоится «25» марта 2016 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.02 на базе ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по адресу:

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и на сайте www.ugatu.su.

Автореферат разослан «15» января 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р. техн. наук, доцент



А.Ю. Демин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Энерго – и ресурсосбережение является одним из приоритетных направлений научных исследований и технических разработок. Общество тратит огромные ресурсы на производство энергии, в том числе электрической. При этом в России на единицу выпускаемой продукции расходуется в три раза больше энергоресурсов, чем в индустриально развитых странах мира.

Возрастающие трудности в силу ограниченности запасов углеводородного топлива преодолеваются ценой больших затрат материальных, трудовых и интеллектуальных ресурсов. Вместе с тем, проведение технических и организационных мероприятий, связанных с энергосбережением и рациональным потреблением энергии, требует значительно меньших затрат.

До 70% вырабатываемой электроэнергии в стране потребляется электроприводом и преимущественно электроприводом переменного тока. При этом потери в электроприводе могут достигать 75% суммарных потерь в системе их электроснабжения. При условии повсеместного внедрения в промышленность энергоэффективных электродвигателей и частотного регулирования, а также энерго-и ресурсосберегающих технологических процессов, потенциал экономии энергии может достигнуть 15 % от производимой в РФ. Однако, в силу многих обстоятельств, на пути развития энергосбережения и энергоэффективности в стране существуют различного рода препятствия. Среди которых необходимо отметить следующие:

- отсутствие системного подхода к задачам ресурсоэффективности, в связи с чем сокращение энергозатрат в производственной сфере входит в противоречие с интересами производителей энергетических ресурсов;
- проблема повышения ресурсоэффективности в большей степени рассматривается на уровне производства и транспортировки электроэнергии и недостаточно в сфере её использования, и прежде всего, в электроприводах, которые являются основными потребителями;
- широкое внедрение частотно-регулируемого электропривода затруднено в связи с относительно высокой стоимостью преобразователей частоты (ПЧ); кроме того, при массовом их внедрении появляются серьезные трудности, связанные с вопросами качества и надежности электропитания.

В силу этих обстоятельств основными направлениями ресурсоэффективности в электроприводе является повышение его надежности, за счет проактивного диагностирования.

Актуальность работы. В настоящее время можно добиться существенного повышения технико-экономических показателей предприятий за счет повышения надежности электрического и механического оборудования. В этом случае происходит увеличение времени между текущими и капитальными ремонтами, что значительно сокращает эксплуатационные расходы и экономит материальные и другие ресурсы. Металлургическое производство является самым затратным по электропотреблению поскольку в нем сконцентрировано значительное количество электроприводов. Электроприводы переменного тока в этой отрасли преобладают как по количеству (более 70%), так и по совокупной установленной мощности (около 80%). Большинство из них в настоящее время продолжают оставаться нерегулируемыми и не оснащены пусковыми устройствами. Повсеместный переход к регулируемому электроприводу требует значительных капиталовложений и не может сразу дать заметного повышения ресурсоэффективности. Не представляется возможным при внедрении ПЧ одновременно массово заменить двигатели, ресурс которых полностью не выработан. При этом недостаточное внимание уделяется изучению влияния устройств плавного пуска на старение изоляции традиционных асинхронных двигателей (АД), которые длительно эксплуатировались в условиях питания от сети.

Главной причиной ускоренного износа парка электродвигателей и аварийного выхода их из строя являются, как известно, тяжелые условия прямого пуска, обусловленные многократными, по отношению к номинальным значениям, пусковыми токами и ударными моментами колебательного характера. Массовое внедрение современных полупроводниковых устройств безударного пуска для высоковольтного электропривода затруднено в связи с тем, что при существующих методиках расчета экономической эффективности, срок их окупаемости значительно превышает нормативный. Данная ситуация вызвана отсутствием апробированных методик обоснования экономической эффективности от внедрения пусковых устройств двигателей большой и средней мощности. Отсутствуют также оценки, связанные с прогнозом влияния их на показатели ресурсоэффективности.

Отдельно следует отметить, что все проводимые экономические расчеты опираются на рыночную стоимость традиционных пусковых устройств, что не может являться достаточным основанием для их выбора. Требуется исследование, связанные с созданием более простых, надежных и недорогих в реализации способов и устройств безударного пуска для высоковольтных электродвигателей переменного тока.

Сложившаяся практика обслуживания электроприводов переменного тока не ориентирована на проактивное диагностирование, которое

позволяет обнаружить на ранней стадии развивающиеся дефекты и выявить причины их возникновения, тем самым способствуя предотвращению аварий с тяжелыми последствиями. Недостаточно изучены и внедрены в производство научно обоснованные методики диагностирования электроприводов переменного тока. Между тем, известно, что многие причины снижения надежности эксплуатации электрооборудования связаны с развитием дефектов, возникших в двигателях после многократных ремонтов, проведенных с нарушением технических условий.

Заметный вклад в развитие энерго- и ресурсосбережения средствами электропривода внесли: Браславский И.Я., Ильинский Н.Ф., Козярук А.Е., Крылов Ю.А., Рогинская Л.Э., Сабинин Ю.А., Шрейнер Р.Т. и др.

Вопросами разработки систем диагностирования электроприводов занимались отечественные: Барков А.В., Бешта А.С., Гашимов М.А., Герике Б.Л., Гольдберг О.Д., Лукьянов С.И., Муравлев О.П., Осипов О.И., Сивокобыленко В.Ф., Усынин Ю.С. и др.; зарубежные: *Deleroi W., Dorrell D.G., Thomson W.T.* и др. исследователи.

Проведенный обзор состояния значимой народнохозяйственной проблемы, связанной с повышением ресурсоэффективности электроприводов переменного тока, указывает на необходимость развития концепции проактивного диагностирования в комплексе с разработкой новых методов, реализуемых на базе современных программно-аппаратных средств, а также создания современных пусковых устройств асинхронных электроприводов и развития методик определения энерго-и ресурсоэффективности от их внедрения.

Работа выполнялась в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, по мероприятию 1.2.1 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук», по конкурсу № НК-66П «Проведение поисковых научно-исследовательских работ по направлению «Создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии», по проблеме «Создание и внедрение энергосберегающих систем управления электроприводами переменного тока оборудования металлургических агрегатов на ОАО «ММК».

Степень разработанности темы исследования подтверждается актами внедрений (6), публикациями в журналах, входящих в перечень ВАК РФ (18), монографиями (5), учебными пособиями (5), патентами на изобретения (2), патентом на полезную модель, свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ (2).

Целью диссертационной работы является повышение эффективности эксплуатации высоковольтных асинхронных электроприводов,

основанное на концепции проактивного диагностирования, альтернативных способах и устройствах их пуска.

Для достижения цели поставлены следующие основные задачи:

1. Выполнить анализ технического состояния электроприводов переменного тока промышленности и методов их диагностирования. Определить концептуальные задачи по повышению их ресурсоэффективности.

2. Разработать эффективную методику диагностирования асинхронных двигателей на основе концепции проактивного обслуживания.

3. Разработать проблемно-ориентированные модели состояний асинхронного двигателя, в том числе и теплового, для проведения оценки ресурсоэффективности технических мероприятий по повышению надежности электропривода.

4. Разработать и исследовать альтернативные малозатратные способы безударного пуска АД на основе анализа известных способов пуска, определить условия их технической реализации и области эффективного применения.

5. Разработать комплексные математические модели АД в составе систем, реализующих способы безударного пуска.

6. Разработать новый класс пусковых устройств для высоковольтных асинхронных электроприводов, не требующих значительных экономических ресурсов при их реализации.

Научная значимость и новизна работы заключается в том, что она углубляет и расширяет теоретические представления о электроприводах переменного тока, предлагает новые способы и устройства пуска асинхронных двигателей, раскрывает возможности и резервы ресурсоэффективной эксплуатации асинхронного электропривода.

– Разработана методика диагностирования электроприводов переменного тока на основе концепции проактивного обслуживания.

– Обоснованы требования с позиции системного подхода к разработке современных систем диагностирования электроприводов переменного тока, основанные на выявлении неисправностей в динамических режимах работы двигателя.

– Предложены проблемно-ориентированные модели состояния асинхронного двигателя, реализованные на основе конечно-элементной схемы и модели с открытой архитектурой.

– Теоретически обоснованы методы и целесообразность применения для высоковольтных асинхронных электроприводов технологических установок малозатратных пусковых устройств.

– Предложен ресурсоэффективный способ пуска асинхронного двигателя с использованием резервного двигателя (система каскадного пуска).

– Разработан новый класс пусковых устройств на основе трансформаторно-тиристорного пускового устройства и трансформаторного пускового устройства, улучшающие ресурсоэффективность электротехнического комплекса и обеспечивающие увеличение межремонтного срока эксплуатации.

Методы исследования. При решении поставленных задач применялись основные положения теории электромеханического преобразования энергии и теории электропривода, полупроводниковой преобразовательной техники. Теоретические исследования проводились с использованием методов аналитического и численного расчета линейных дифференциальных уравнений. Моделирование разработанных схем проводилось в среде *MatLab*, используя встроенные функции. Исследование работоспособности пусковых устройств осуществлялось в приложении *SimPowerSystems* пакета *MatLab*. Экспериментальные исследования по определению статического момента сопротивления, пусковых характеристик, температурных режимов предложенных устройств плавного пуска проводились на действующих электроприводах промышленного производства ОАО «ММК» и треста «Водоканал», ЗАО «Консом» (г. Магнитогорск), завода решетчатого настила (г. Магнитогорск), Гайского горно-обогатительного комбината (г. Гай) и «Новокаолинового ГОП» (Челябинская обл.).

Экспериментальные исследования по функциональной диагностике дефектов в виде обрывов стержней ротора, тепловые процессы асинхронных двигателей были проведены на лабораторных установках, позволяющих исследовать эти процессы в динамических режимах. Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов подтверждает обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Метод диагностирования, разработанный на основе концепции проактивного обслуживания электроприводов переменного тока, позволяющий реализовать систему технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования, выявлять на ранней стадии причины, вызывающие появление и развитие дефектов асинхронных электроприводов.

2. База данных новых признаков дефектов, появляющихся при обработке токовых осциллограмм пуска АД на основе вейвлет-преобразований, позволяющая по локальным особенностям изменения спектрального состава идентифицировать неисправность двигателя.

3. Принцип и способ реализации пуска АД при каскадном соединении статорных обмоток двигателей, их математические модели и результаты исследований этого способа пуска.

4. Силовые схемы электромеханических систем «трансформаторно-ристорное пусковое устройство – асинхронный двигатель», «трансформаторное пусковое устройство – асинхронный двигатель».

5. Математическое, алгоритмическое и программное обеспечение анализа пусковых устройств, результаты теоретических и экспериментальных исследований.

6. Программа для ЭВМ, реализующая модель теплового состояния асинхронного двигателя, на основе конечно-элементной схемы для оценки распределения потерь в узлах и элементах конструкции двигателя в динамических и стационарных режимах.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается тем, что модель, на которой исследовались режимы каскадного пуска асинхронных двигателей, основана на математическом описании, с учетом физических процессов в асинхронных электроприводах с применением известных в теории электромагнитного и электромеханического преобразования энергии математических преобразований. Моделирование типовых режимов электропривода с помощью разработанной модели показало результаты, аналогичные по характеру и по количественным оценкам данным, которые были получены при использовании известных методов моделирования. Применение трансформаторных пусковых устройств является наименее затратным вариантом модернизации в условиях действующего производства. Практически реализована разработанная концепция и методика диагностирования ряда неисправностей по статорному току пуска АД. При разработке модели АД для исследования развития дефектов использованы уравнения Максвелла, которые корректно отражают работу двигателя. Экспериментальными исследованиями определено, что моделирование электромеханических процессов двигателей соответствуют результатам реальных процессов. На основе разработанной методики исследованы особенности процесса пуска АД при дефектах в виде обрыва в стержнях ротора, отмечено соответствие результатов моделирования и экспериментов по спектральному составу модуля обобщенного вектора тока статора. Непрерывное вейвлет-преобразование *SWT* обобщенного вектора тока при пуске позволяет выявить на ранних стадиях дефекты в электромеханических системах, приводящих к аварийному выходу из строя.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенный способ пуска асинхронных электроприводов при каскадном включении позволяет осуществить «мягкий» пуск мощных высоковольтных электродвигателей без использования специальных пусковых устройств. Повышение надежности эксплуатации оборудования и снижение эксплуатационных расходов обеспечиваются при этом уменьшением

пусковых перегрузок по моменту и увеличением длительности межремонтных циклов. Дополнительное снижение электропотребления достигается при этом способе пуска отключением электродвигателей на время снятия технологических нагрузок. Предложенный способ пуска внедрен на насосной станции охлаждения электропечи ООО «Консом», а также для пуска высоковольтных двигателей насосных агрегатов № 2 и 4 насосной станции № 19 Янгельского водозабора МП треста «Водоканал» г. Магнитогорска.

Применение трансформаторного пускового устройства позволяет реализовать плавный пуск асинхронных двигателей, устройство внедрено в цехе подготовки аглошихты № 2 ОАО «ММК» для управления асинхронным электродвигателем 132 кВт электропривода вентилятора, а также для пуска двигателя вытяжного вентилятора 630 кВт 10кВ цеха «Рудник» Гайского горно-обогатительного комбината, реализована пусковая система для четырех высоковольтных электродвигателей вытяжных вентиляторов 630 кВт «Новокаолиновый ГОП». Разработанная методика диагностирования неисправностей асинхронных двигателей, в отличие от существующих методов, используется в процессе работы электродвигателя в нестационарных режимах, независимо от его загрузки. Это доказывает принципиальную возможность диагностирования неисправностей АД в нестационарных режимах работы и то, что в ряде случаев, данные методы оказываются более эффективными, по сравнению с методами, использующими стационарные режимы. Предложенная конечно-элементная математическая модель АД может быть востребована для последующих исследований и разработки методик диагностирования АД в нестационарных режимах, а связь с конечно-элементной тепловой моделью дает наиболее точное описание процессов, протекающих в машине.

Разработанные математическая модель системы каскадного пуска, конечно-элементная математическая модель АД и конечно-элементная тепловая модель рекомендованы для внедрения в учебный процесс при изучении дисциплин подготовки бакалавров и магистров по направлению 13.03.02 «Электропривод и автоматизация промышленных установок».

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на Международных конференциях «Электроприводы переменного тока ЭППТ» (Екатеринбург, 1998, 2001, 2012 г.); Международных конференциях по автоматизированному электроприводу; «АЭП-2001» (Нижний Новгород, 2001 г.), «АЭП-2004» (Магнитогорск, 2004 г.), «АЭП-2007» (Санкт-Петербург, 2007г), «АЭП-2010» (Тула, 2010 г.), «АЭП-2012» (Иваново, 2012), «АЭП-2014» (Саранск, 2014); XII Международной научно-практической конференции «Современная техника и технология» (Томск, 2006); Международной конференции «Электроэнергетика и Автоматиза-

ция в металлургии и машиностроении» (Магнитогорск, 2008 г.); Международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании» (Одесса, 2009); Международной научно-практической конференции «Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах» (Пенза, 2010 г.); III и IV Международном промышленном форуме «Реконструкция промышленных предприятий – прорывные технологии в металлургии и машиностроении» (Челябинск, 2010, 2011 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий» *Electro-2011* (Уфа, 2011 г.); на *XVII CONGRESS Energy efficient, economically sound, Ecologically respectful, educationally enforced Electro-technologies 21-25 MAY, 2012, St. Petersburg*; 59-72-й научно-технических конференциях по итогам научно-исследовательских работ ФГБОУ ВПО «МГТУ» им. Г.И. Носова (2002-2015 г.), а также на семинарах и совещаниях, посвященных развитию энергосберегающих электроприводов переменного тока предприятий Уральского региона.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано более, чем в 100 работах, в том числе: в 18 работах в изданиях, рекомендованных ВАК, в 5-и монографиях, 2-х патентах, патенте на полезную модель и 2-х свидетельствах о регистрации программ.

Личный вклад автора. Результаты, изложенные в диссертации, получены лично автором, вклад автора в работах, написанных в соавторстве, заключается в разработке методов анализа и синтеза пусковых устройств, разработке и реализации алгоритмов и программ исследования АД, проведении натуральных экспериментов и компьютерного моделирования, обработке данных и анализе полученных результатов, их обобщении в виде выводов и рекомендаций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 215 наименований и 5 приложений, 109 рисунков и 15 таблиц, объем 255 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрено состояние вопроса, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы.

В первой главе «Анализ известных методов и технических решений повышения ресурсоэффективности асинхронных электроприводов» проведен анализ состояния электроприводов переменного тока в металлургической и горнорудной промышленности. При решении проблем ресурсосбережения и энергетической эффективности электрооборудования

промышленных предприятий и, в частности, систем электропривода используются различные подходы, связанные, прежде всего, с тем, что решается разными школами электропривода и их исследователями. Несмотря на отсутствие единого подхода к проблеме все основные направления определяются, всего двумя путями:

- ресурсосбережение непосредственно электроприводов;
- ресурсосбережение систем электропривода в технологическом процессе.

При этом многие исследователи отмечают взаимосвязь между этими направлениями, которая затрагивает как особенности систем электропривода, так и технологические аспекты рабочих машин.

Важным моментом являются и то, что парк электрооборудования устарел. Так, на ОАО «ММК» работают трансформаторы 1932 года выпуска, двигатели транспортеров 1930 и 1944 года выпуска. С одной стороны, такие факты являются показателем качественного исполнения электрооборудования, а с другой – свидетельствует о необходимости прогнозирования его ресурса с достаточной высокой точностью.

В настоящее время удельные затраты на ремонт (при учете транспортных и иных расходов, связанных с аварийным выходом электромашины из строя) приближаются к стоимости новых машин. По данным электроремонтных служб, происходит ежегодное увеличение стоимости ремонтов. Так, по сравнению с 2008 годом произошло увеличение стоимости ремонта на 14% для маломощных двигателей и до 31% для двигателей мощностью больше 90 кВт. При этом стоимость капитального ремонта для двигателей до 22 кВт соизмерима со стоимостью нового двигателя. Снижение производительности производственных установок приводит к снижению ресурса электроприводов по целому ряду показателей, так или иначе связанных с числом пуска электрических двигателей (в том числе и регулируемых электроприводов).

Анализ литературных источников и наши исследования показывают, что существенное снижение энергопотребления за счет широкого применения регулируемого электропривода в настоящее время мало реализуемо ввиду большого срока окупаемости его при реконструкции. Регулируемый электропривод должен применяться там, где это экономически целесообразно, а не повсеместно.

Создание пусковых устройств для высоковольтных АД является сложной задачей. Важно понимать, что пусковые системы по своей сути представляют собой особый класс ресурсо- и энергосберегающего оборудования и тесно связаны с общей и частными задачами реализации энергосбережения. Неоправданно, в этой связи, делать одностороннюю ориентацию только на регулируемый электропривод. Многие задачи ресурсо-

сбережения могут быть решены с использованием устройств, обеспечивающих пуск двигателя, при ограничении токовых, механических и тепловых нагрузок. Основными требованиями, предъявляемыми к электро-механическим системам, являются:

- ограничение динамических токовых нагрузок;
- возможность увеличить число пусков в единицу времени без опасности перегрева обмоток двигателя;
- возможность последовательного пуска нескольких двигателей от одного пускового устройства;
- обеспечение необходимых пусковых условий для разных производственных механизмов;
- реализовать экономически обоснованную систему пуска.

Эти требования удовлетворяют системы «мягкого» пуска, использование которых позволит значительно расширить время безаварийной работы электроприводов, увеличить количество допустимых включений за фиксированный интервал времени, снизить аварийность не только электроприводов, но и технологического оборудования, а значит и ресурсосбережения электропривода в целом.

Широкомасштабные исследования, проводимые кафедрой электроники и микроэлектроники ФГБОУ ВПО «МГТУ» им. Г.И. Носова г. Магнитогорск выявили, что вследствие перегрузок обмоток статора при пуске АД на ГОП ОАО «ММК» в 2005-2011 гг. вышли из строя 49 единиц высоковольтных АД экскаваторов типа ЭКГ при парке 50 единиц. На горно-обогатительном комбинате (г. Гай, Оренбургской обл.) 70 % от общего числа выходов из строя высоковольтных АД происходит вследствие разрушения статорной обмотки в процессе пуска и коротких замыканий в статоре.

На основе результатов исследований и практических наработок были выявлены наиболее распространенные неисправности асинхронных электродвигателей, которые в обобщенном виде представлены на рисунке 1.

В целом, по условиям пуска, электроприводы промышленных механизмов можно разделить на три группы. Каждая из них характеризуется определенным типом механических характеристик. Вентиляторы и насосы относятся к первой группе механизмов, для которых условия пуска считаются нормальными, так как начальный момент сопротивления находится на уровне сопротивления холостого хода. Электроприводы второй группы работают практически при постоянном моменте. К ним, в первую очередь, относятся конвейеры, подъемники, транспортеры и другие им подобные по виду механических характеристик механизмы. Для этой группы условия пуска следует считать тяжелыми. Сверхтяжелыми счита-

ются условия пуска третьей группы механизмов. Особенности пуска таких механизмов следует рассматривать отдельно. Во время проведения исследований на ГОП ОАО «ММК», Гайский ГОК и др. наблюдалось, что зачастую электроприводы эксплуатируются с перегрузками, как кратковременными, так и длительными; с низким КПД; установлены с нарушением требований (на «мягких» опорных плитах); работают с недопустимой расцентровкой валов и т.д.

По этой причине предлагается использовать концепцию проактивного диагностирования электроприводов при эксплуатационных и сервисных (ремонтных) работах, основанной на системе функциональной диагностики асинхронных электроприводов. В основу концепции составляют следующие положения:



Рисунок 1 – Распределение неисправностей АД

1. В качестве диагностических величин, характеризующих работу электропривода, рационально использовать параметры, для измерения которых не требуется непосредственного доступа к электродвигателю. Такими координатами являются токи и напряжения статора двигателя, а также скорость вращения, в том случае, когда применение такого датчика необходимо по структуре системы автоматического управления технологическими процессами.

2. Представляется уместным вести разработку автоматизированной системы проактивной диагностики асинхронных электроприводов на основе нескольких методов, каждый из которых направлен на поиск дефек-

тов в различных режимах работы. Сопоставляя и анализируя результаты, полученные разными методами и в разных режимах работы АД, возможно повысить точность прогноза состояния электропривода и, тем самым, увеличить межремонтные сроки. Иными словами, разработанная и внедренная система проактивного диагностирования, для достижения желаемого экономического эффекта, должны выстраиваться на системном анализе режимов работы АД различными методами.



Рисунок 2 – Составляющие проактивного обслуживания

3. Трудность в решении этой задачи заключается в том, что получение диагностической информации, особенно в переходных режимах работы, пока недостаточно исследовано на предмет определения дефектов по причине сложного характера протекающих в этот момент процессов, как электромагнитных, электромеханических так и тепловых. Изучение особенностей протекания переходных процессов в двигателе при наличии в них конкретных неисправностей приведет к расширению возможности системы проактивного диагностирования, построенной на основе анализа токов и напряжений статора.

Основываясь на данной концепции и зная условия работы электроприводов, предлагается новый метод диагностирования, который позволяет в динамических режимах (а это, прежде всего, пусковые режимы для такого рода оборудования) по обобщенному вектору тока определять его состояние.

Во второй главе «Разработка методики диагностирования для повышения ресурсоэффективности асинхронных электроприводов», показано, что ряд дефектов не удастся идентифицировать в статических режимах, так как большинство двигателей работают с нагрузкой меньше номи-

нальной. Подтверждено, что большинство дефектов проявляется на ранних стадиях возникновения при нагрузках значительно, превышающих номинальные значения, а именно в переходных процессах.

Согласно принципу суперпозиции неисправный двигатель может быть представлен как суперпозиция двух подсистем. Первая подсистема – это исправный двигатель, подключенный к питающей сети; вторая – это двигатель с закороченными статорными обмотками, вращающийся с той же скоростью, что и первый, при этом в обрыв каждого стержня включается источник тока. Значение токов в оборванных стержнях равно по значению соответствующим токам в стержнях исправного двигателя первой подсистемы, но противоположно по направлению. Таким образом, при сложении двух подсистем получаем нулевой ток в оборванных стержнях.

Поведение двигателя первой подсистемы полностью аналогично поведению исправного двигателя, описанному выше. Источники тока второй подсистемы создают магнитное поле, пульсирующее с частотой ω . Данное пульсирующее поле может быть представлено двумя вращающимися полями.

Из экспериментов имеем результаты расчета пуска исправного двигателя и двигателя с обрывом двух стержней ротора. Назовем их $C1$ и $C2$ соответственно. Третий и четвертый эксперименты, назовем их $C11$ и $C22$, должны представлять собой первую и вторую подсистемы описанного выше принципа суперпозиции.

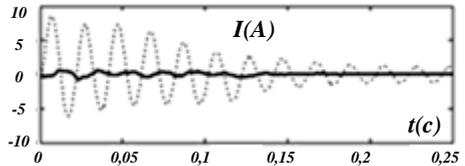
Идея $C11$ и $C22$ заключается в том, чтобы рассчитать компоненты статорного тока, вызванные рассматриваемой неисправностью ротора, и проанализировать их поведение в пусковом режиме. При этом результаты $C22$ и будут искомыми компонентами статорного тока, а $C11$ служит для проверки достоверности полученных результатов. Но для того чтобы применить принцип суперпозиции к пусковому режиму, необходимо учесть как насыщение магнитопровода, так и вытеснение тока в пазах ротора, которое в пусковых режимах имеет значительное влияние на переходный процесс.

Для учета насыщения магнитопровода необходимо в $C11$ и $C22$ использовать значения магнитной проницаемости для каждого конечного элемента и в каждый момент времени, рассчитанные в $C2$. Учет вытеснения тока в пазах ротора для $C1$ и $C2$ достигается отдельным расчетом тока в каждом конечном элементе каждого паза. Следовательно, для учета вытеснения тока в $C22$ необходимо заменить источник тока, включенный в каждый оборванный стержень, несколькими параллельно соединенными источниками тока, число которых равно числу конечных элементов в пазе ротора. При этом ток в каждом конечном элементе оборванного стержня $C22$ в каждый момент времени будет определяться током соответствующим

шего конечного элемента, рассчитанного в $C11$. Скорость вращения ротора в $C11$ и $C22$ одинакова и равна скорости, рассчитанной в $C2$.

На рисунке 3 представлен результат расчета $C22$ – дополнительные составляющие статорного тока фазы A , вызванные неисправностью ротора. Пунктиром показан исходный сигнал статорного тока неисправного двигателя ($C2$).

Рисунок 3 – Пусковой ток двигателя с 2-мя сломанными стержнями (пунктир) и расчетные дополнительные компоненты тока (сплошные)

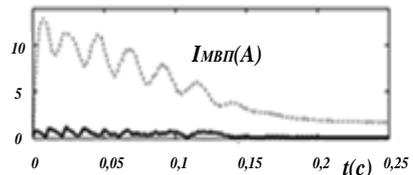


Как видно из графиков рисунка 3, амплитуда дополнительных составляющих тока в статорных обмотках, ассоциированных с повреждениями ротора, значительно меньше амплитуды основной частоты питающей сети, которую в данном случае можно рассматривать как помеху. Это создает определенные трудности при выявлении неисправности. Для решения данной проблемы предлагается использовать подход, который не оказывает влияние на дополнительные составляющие статорного тока, основан на анализе модуля вектора Парка тока (обобщенного вектора тока) и известен как *extended Park vector approach (EPVA)*. Преобразования Парка используются для приведения трехфазной системы (A - B - C) к эквивалентной двухфазной (D - Q). Модуль вектора Парка тока позволяет представить трехфазный статорный ток эквивалентным постоянному току, а постоянная составляющая может быть значительно легче отфильтрована из исходного сигнала по сравнению с первой гармоникой питающей сети (рисунок 4). Выражение для модуля вектора Парка (МВП) тока:

$$I_s = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (1)$$

При рассмотрении влияния дополнительных составляющих тока, вызванных заданной неисправностью, рассчитанных с помощью конечно-элементного моделирования и принципа суперпозиции на статорный ток в пусковом режиме, можно показать, что дополнительные составляющие статорного тока, определяемые по формуле (1), проявляются в модуле вектора Парка тока на частоте $f_{P\text{rotorbar}} = 2sf_1$.

Рисунок 4 – Обобщенный вектор пускового тока двигателя с 2-мя неисправными стержнями (пунктир) и дополнительные компоненты тока (сплошные)



Тогда в начале пуска частота данных составляющих максимальна и равна 100 Гц. По мере изменения скольжения в ходе разгона двигателя частота уменьшается и становится почти равной нулю к моменту выхода на статический режим. Обрывы стержней приводят к появлению магнитного поля ротора обратной последовательности. В момент времени, когда скольжение двигателя уменьшается до 0,5, обратное поле меняет направление вращения по отношению к статору. Так как в данный момент скорость вращения поля снижается до нуля, то, следовательно, влияние неисправности ротора на ток статора становится минимальным. В ходе исследований выявлено, что при изменении направления вращения поля меняется характер поведения наведенных им дополнительных составляющих. В связи с этим предлагается условно поделить пусковой процесс во временной области на две зоны. Первая зона, именуемая нами далее зоной высокого скольжения, соответствует диапазону изменения скольжения двигателя от 1 до 0,5. Вторая зона, зона низкого скольжения, лежит в диапазоне изменения скольжения от 0,5 до установившегося значения.

На рисунке 5 показаны спектрограммы дополнительных составляющих, полученных с помощью процедуры непрерывных вейвлет-преобразований (СВТ). Данные графики демонстрируют различия в характере поведения данных составляющих в частной области для различных диапазонов скольжения. Данные паттерны соответствуют графику изменения частоты составляющей $2sf_1$ в сигнале МВП пускового тока. Это доказывает тот факт, что левая и правая боковые гармоники доминируют над остальными составляющими, вызванными неисправностью, в указанном диапазоне частот.

Что касается паттерна изменения амплитуды, как и ожидалось, значения вейвлет-коэффициентов уменьшается, когда магнитное поле ротора, вызванное неисправностью, меняет свое направление, т.е. когда скольжение становится равным 0,5.

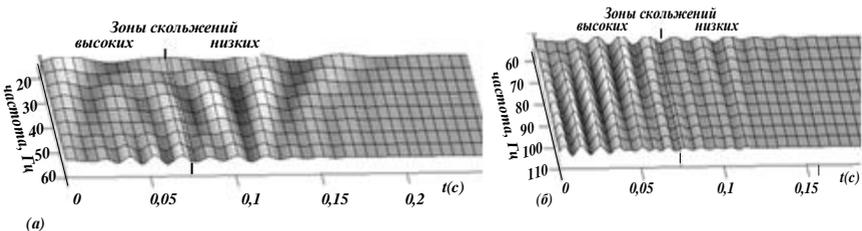


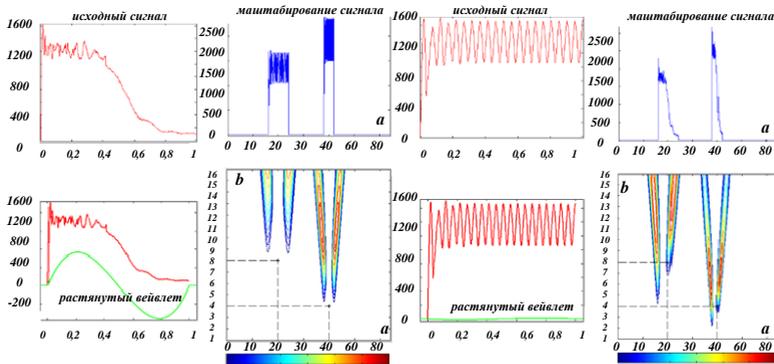
Рисунок 5 – Спектрограммы моделируемых неисправностей дополнительных компонент для диапазона частот от 20 до 60 Гц (а) и от 60 до 110 Гц (б)

Таким образом, предлагаемый новый подход в диагностике асинхронных двигателей в динамических режимах, основан на проведении оценки статорного тока во время пуска. Принцип суперпозиции, который применялся для диагностики неисправного ротора асинхронного двигателя в стационарном режиме, был нами распространен и для динамических режимов. Показано, что сочетание принципа суперпозиции с применением пошагового метода конечных элементов обеспечивает точную оценку тока статора. Он может быть использован для установления дефекта, независимо от условий эксплуатации двигателя, выбранного инструмента обработки сигнала и других факторов. Проведенная проверка предлагаемого подхода показывает, что он хорошо согласуется с экспериментальными результатами, а также с вопросами, ранее рассмотренными в технической литературе.

Данный метод требует для реализации измерения хотя бы двух токов и является предметом разумного баланса между стоимостью и надежностью системы диагностики.

Исследования процессов пуска различных асинхронных двигателей механизмов горно-обогатительного производства ОАО «ММК» позволили набрать обширный статистический ряд обобщенных векторов пуска. Были обследованы двигатели от 2,2 кВт (двигатель вытяжной вентиляции поста сварки) до двигателя 132 кВт (вентилятор) (общее количество двигателей составило более 50 шт.), с периодичностью раз в квартал начиная с февраля 2010 года. В качестве аппарата обработки сигналов выбрано непрерывное вейвлет-преобразование CWT из пакета *MatLab*. Континуальный вейвлет-анализ можно представить мощным инструментом временного и спектрального анализа, с помощью которого стоятся частотно-временные характеристики сигнала, раскрывающие природу не только самого сигнала, но и его составляющих. Постепенно усложняя процесс обработки, в пакете осуществляются дилатация материнской функции, т.е. ее растяжение и сжатие в « a » раз. Однако представляет интерес видимое поведение исходного сигнала (обобщенного вектора тока), амплитуда его при изменении вейвлет-функции будет стремиться к константе, если сжимать вейвлет и, иметь полные периоды для растянутого вейвлета (рисунок 6 а). Из этого рисунка видно, что результирующее непрерывное вейвлет-преобразование $CWT(a, b)$ представляется функцией двух переменных: корреляционного сдвига « b » и масштабирующей переменной « a » материнской вейвлет-функции. Заметно, что экстремумы континуального преобразования, показанные на диаграмме, характеризуют место всплесков сигнала, которое соответствует значению масштабирующего коэффициента вейвлета (это демонстрируют и контурные линии, сходящиеся к вершинам экстремумов).

В качестве двух пар (a,b) заданы значения $(20,8)$ и $(40,4)$, которые материализуются пунктирными линиями в правом нижнем графике контура участка *СWT*. Обнаружение экстремумов в этих точках характерно для обобщенных векторов пускового тока всех исследованных двигателей, не имеющих неисправностей. Поэтому можно предположить, что два локальных максимумов абсолютных значений непрерывных коэффициентов вейвлет подходят для идентификации исправности двигателя.



а)

б)

Рисунок 6 – Непрерывное вейвлет-преобразование обобщенного вектора тока исправного двигателя (а) и двигателя с неисправностью (б) (межвитковое замыкание)

При исследовании двигателя насоса 45 кВт получен сигнал обобщенного вектора тока (рисунок б б), на первый взгляд, типичный остальным. При исследовании его с помощью непрерывного вейвлет-преобразования *СWT* наблюдается увеличение амплитуды растянутого вейвлета, также смещение экстремумов корреляционного сдвига «*b*» и масштабирующей переменной «*a*» материнской вейвлет-функции. В декабре этот двигатель был выведен из эксплуатации, причина - межвитковое замыкание статорных обмоток. Также можно выявить на ранних стадиях и такую неисправность, как старение изоляции, приводящее к межвитковому замыканию.

Для двигателя АЗ мощностью 500 кВт, напряжением 3000 В проходившем средний ремонт в 2001 году аглоцеха ГОП ОАО «ММК» перед следующим средним ремонтом были записаны значения пусковых токов и по ним построена кривая обобщенного вектора тока, затем, она была об-

работана в пакете *MatLab* непрерывным вейвлет-преобразованием (рисунок 7 а).

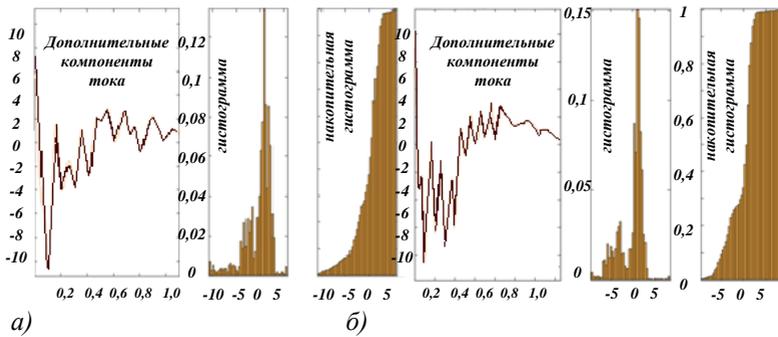


Рисунок 7– Кривая обобщенного вектора тока, его гистограмма и кумулятивная гистограмма до ремонта а) и после ремонта б) асинхронного двигателя

При последующем вводе в эксплуатацию этого двигателя получена аналогичная кривая (рисунок 7 б), но кумулятивная гистограмма заметно отличается от предыдущей.

Это наглядно свидетельствует об изменениях, произошедших в двигателе при ремонте. Измерения тока холостого хода показало его увеличение на 5 %, это может говорить либо о том, что нарушена магнитная система либо, о том, что изменился воздушный зазор. Воздушный зазор не изменялся, следовательно, произошло изменение в магнитной системе двигателя.

Предлагаемая методика исследований на основе конечно-элементной модели асинхронного двигателя, позволяет моделировать неисправности, как электромагнитной, так и в магнитной системе. Дает возможность создать, в конечном итоге, библиотеку дефектов и алгоритмы их идентификации.

В третьей главе «Совершенствование и разработка тепловых моделей асинхронного двигателя для оценки ресурсосбережения», разработана комплексная конечно-элементная тепловая модель АД, рассчитывающая совместно электромагнитные, электромеханические и тепловые процессы. В объектно-ориентированной тепловой модели АД учитываются следующие явления: нагрев обмоток статора и ротора протекающими по ним токами; нагрев магнитопровода машины вследствие перемагничивания и токами Фуко; теплообмен двигателя с окружающей средой и теплообмен внутри двигателя (между обмотками и магнитопроводом, между магнитопроводом и воздушным зазором и т.д.); учет конвекционного охлаждения магнитопровода вследствие самоохлаждения двигателя. Как

результат – температурное поле в любом поперечном сечении двигателя. Метод конечных элементов в двумерной постановке позволяет рассчитывать плоскопараллельные поля. Температурное поле двигателя не является плоскопараллельным, то есть оно разное в разных сечениях двигателя. Поэтому требуется постановка задачи в трехмерной области.

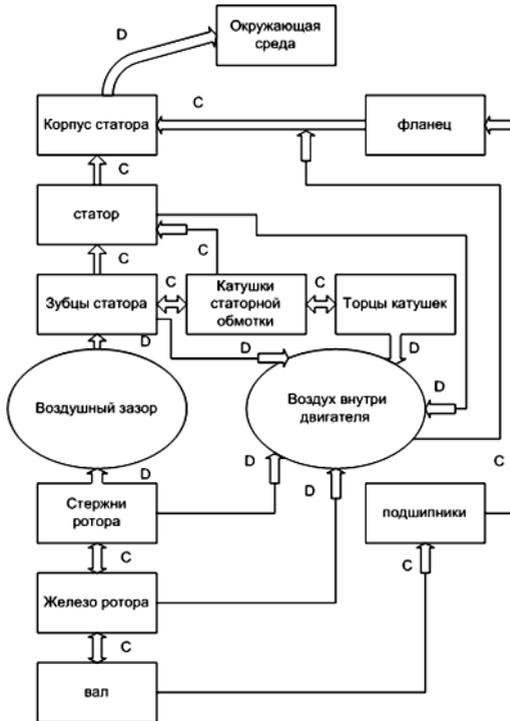


Рисунок 8 – Карта термических обменов в асинхронной машине: С – термическая проводимость; D – конвекция

При этом плотности токов в обмотках двигателя и параметры магнитного поля являются входными данными для определения тепловыделения при расчете тепловых явлений. Общая эквивалентная термическая сеть асинхронной машины представлена на рисунке 8. Соединения между блоками, имеющими взаимную теплопередачу, осуществлены на уровне периферийных связей. Источники выделения тепла (потери) описываются на уровне центрального узла (узел со средней температурой). Для изучения переходных тепловых процессов, а также термических способностей каждого блока записаны в центральном узле блока, пренебрегая термиче-

скими способностями воздуха и изоляционных материалов. Эквивалентная термическая сеть асинхронного двигателя включает 17 узлов:

- номера узлов от 1 до 9 соответствуют основным частям машины (средняя температура в узле) и включают их термические способности;
- узлы 10 и 11 соответствуют воздушному зазору и воздуху внутри машины, чьими термическими способностями можно пренебречь;
- узлы от 12 до 17 - узлы связи.

Решение i -го уравнения запишется в виде:

$$V_i(t) = V_i(t_0) \exp(-\lambda_i(t - t_0)) \left(V_i(t_0) + \int_{t_0}^t \exp \lambda_i(s - t_0) \check{F}_i(s) ds \right) \quad (2)$$

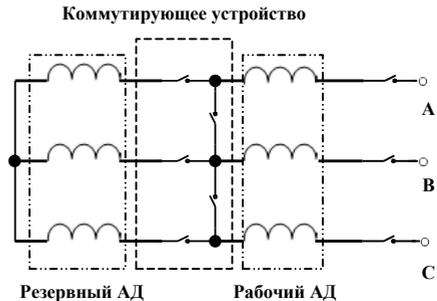
Потери оцениваются в электромагнитной модели. Зная, что сопротивление ротора и статора изменяется, то поправку на температуру необходимо брать из тепловой модели. Для проверки адекватности работы программы конечно-элементной тепловой модели использовали тепловизор *SDS HotFind-D*, который подтвердил полученные результаты.

Общеизвестно, что с ростом частоты пусков двигателя срок службы изоляции уменьшается, на предприятиях стремятся сократить число последовательно проводимых пусков. При снижении кратности пускового тока, можно существенно увеличить срок службы изоляции, межремонтные периоды и сохранить ресурс двигателя. Таким образом, возникает задача разработки новых устройств и способов, ранее не используемых для пуска асинхронных двигателей, снижающих кратность пускового тока.

Четвертая глава «Разработка новых способов и технических решений для повышения ресурсосбережения» посвящена исследованию каскадного пуска асинхронных двигателей. Для этого разработана математическая модель объектно-ориентированного двухдвигательного электропривода с последовательным соединением обмоток статора. Структурная схема электромеханической системы, в которой реализуется каскадный пуск двух двигателей, представлена на рисунке 9.

Рисунок 9 – Структурная схема 2-двигательной системы каскадного пуска

Проводимые исследования необходимы для определения практического применения и особенностей при каскадном



пуске асинхронных двигателей. Для этого проведены оценки возможности реализации каскадного пуска в различных условиях, таких как, когда параметры двигателей отличаются друг от друга, технические параметры двигателей различны, у двигателей различная нагрузка и т.д. Проведены типовые лабораторные исследования, установившие адекватность модели объектам моделирования.

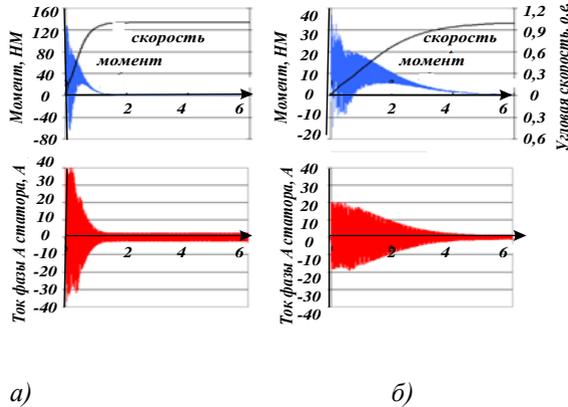


Рисунок 10 – Пусковые характеристики одного двигателя (а) и каскадное включение (б)

Можно видеть из графиков (рисунок 10), что при каскадном пуске снижаются вдвое амплитуды пусковых токов и ограничиваются ударные пусковые моменты в три раза. Можно заключить, что в этой системе достигается такой же результат, как при использовании специально разработанных полупроводниковых пусковых устройств. Для перевода двигателей из каскадного включения в режимы работы, соответствующее технологическому процессу, а это, как правило, работа двигателя с полным напряжением питания, следует осуществить переключения в силовой цепи, или один из двигателей отключить при пуске одного, либо оба включить на полные напряжения питания. В том и другом случае это является дополнительным возмущением. Все переключения связаны с разрывами в статорных цепях двигателей и дальнейшее включение двигателя (двигателей) на полное напряжение питания.

В работе рассмотрены процессы переключения при следующих допущениях: переключения ключей происходят мгновенно, конечное значение магнитного потока двигателя до коммутации равно начальному значению после коммутации. Наиболее интересны результаты, полученные

при скоростях вращения двигателя при достижении частот 30, 50, 70 и 90 % от номинальной.

При какой бы скорости не происходил процесс переключения двигателей на полное напряжение питания – это приводит к броску тока, величина броска тока зависит от того, при какой скорости происходит переключение. Переключение при скорости вращения 70 % приводит к броску тока, не превышающему значение пускового тока при каскадном пуске. В производственных условиях имеет место неравномерное деление нагрузок между двигателями. Как показали исследования двигатель, к которому прикладывается нагрузка, останавливается, а второй разгоняется до номинальной скорости. На основании этого исследования предлагается способ пуска, при котором один из пускаемых двигателей заведомо затормаживается или к нему прикладывается нагрузка не превышающая 10 % M_n .

Исследования проводились на насосной станции охлаждения электропечи ООО «Консом». В состав насосной станции входят три контура охлаждения, каждый из которых обеспечивает подачу воды своим двигателем. Непосредственно с основными двигателями расположены резервные. Станция оборудована шестью однотипными двигателями типа *АИР160S2*, 15 кВт, 3000 об/мин. Каскадный пуск высоковольтных двигателей применен для пуска насосных агрегатов № 2 и 4 насосной станции № 19 Янгельского водозабора МП трест «Водоканал» г. Магнитогорска. Двигатели насосных агрегатов типа А4-400У-4МУ3 мощностью 630 кВт и напряжением питания 6000 В, с номинальным током 74 А имеют однотипные резервные двигатели, таким образом, были все предпосылки для внедрения каскадного пуска.

В пятой главе «Разработка и исследование трансформаторно-тиристорного пусковых устройств для повышения ресурса асинхронных электроприводов» показано, что для пуска высоковольтных электроприводов применение полупроводниковых устройств, как правило, не может окупиться в нормативные сроки. Проведем оценку срока окупаемости от применения пусковых устройств. Пусковое устройство, рассчитанное на мощность 5,5 кВт, должно экономить электроэнергию на уровне не менее 0,6 %, а для 400 кВт – уже 5,5 %.

Приведем графики зависимостей (рисунок 11) требуемой экономии электроэнергии от мощности преобразователя частоты (ПЧ) (синяя линия) и устройств плавного пуска (УПП) (красная линия), при сроке окупаемости в 1,5 года. Зону окупаемости выделим зеленым цветом. На рисунке представлены зоны, в которых устройства не окупятся и за 1,5 года, для преобразователей частоты это синие линии, для устройств плавного пуска – красные. Если будем учитывать, что преобразователи частоты окупаются за счет экономии электроэнергии, то они не окупятся и за 1,5 года, ко-

гда они применяются для маломощных двигателей. Экономия электроэнергии, в данном случае, по расчетам больше единицы. Вид условной кривой окупаемости устанавливаемых устройств зависит от отношения цены устройства к его мощности.

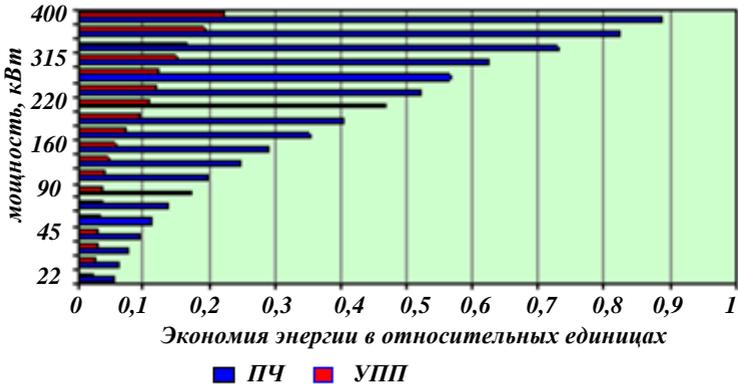


Рисунок 11 – Зоны окупаемости устройств

Поэтому предлагается вместо серийно выпускаемых пусковых устройств применять новые способы пуска двигателей, позволяющие также осуществлять «мягкие» пуски при существенном снижении кратности пусковых токов и динамических нагрузок.

Предложены силовые схемы новых трансформаторно-тиристорных пусковых устройств, позволяющих проводить «мягкий» пуск асинхронного двигателя с плавным изменением подводимого к его статорным обмоткам напряжения. В разработанном пусковом устройстве статорная обмотка включается последовательно в цепь первичной обмотки трансформатора, который применяется в качестве пускового устройства. Вторичную обмотку этого трансформатора подключаем к тиристорному преобразователю напряжения (ТПН) (рисунок 12 б). В схеме ТПН может быть заменен на мостовой выпрямитель (рисунок 12 а).

Когда тиристоры закрыты, вторичная обмотка, да и сам трансформатор, находится в режиме холостого хода. Эквивалентное сопротивление первичной обмотки велико, и двигатель, включенный последовательно с этой обмоткой, заторможен. При открытии тириستоров происходит рост тока, как в первичной обмотке, так и вторичной. Рост тока в первичной обмотке приводит к разгону двигателя. Если переведем трансформатор в режим короткого замыкания, то напряжение на первичной обмотке будет уменьшаться, при этом напряжение на двигателе начнет расти. По окон-

чании процесса пуска ток двигателя снижается, а напряжение на статорной обмотке становится равным напряжению питания за минусом падения напряжения на первичной обмотке трансформатора.

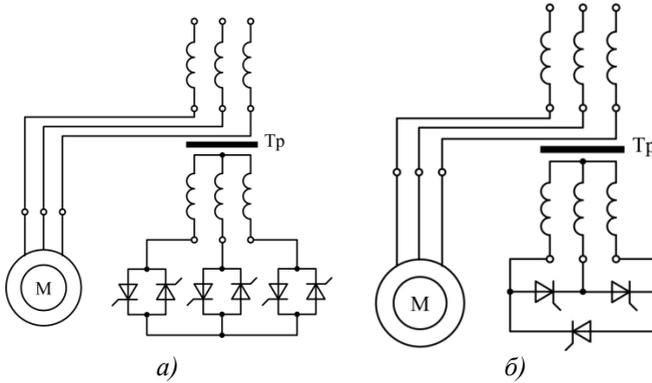


Рисунок 12 – Варианты силовых схем трансформаторно-тиристорного пускового устройства

Процессы, происходящие в такой схеме, можно рассмотреть при помощи схемы замещения, представленной на рисунке 13. Трансформатор и двигатель представляются классическими Т-образными схемами замещения, которые соединяются последовательно. Тиристорный преобразователь напряжения включен во вторичную обмотку трансформатора – переменное сопротивление $Z'_{2н}$. Исследования этой схемы проводилось с использованием разработанной объектно-ориентированной математической модели.

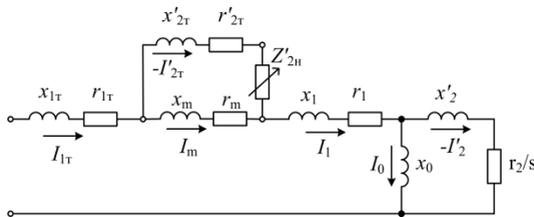


Рисунок 13 – Схема замещения трансформаторно-тиристорного пускового устройства

Для исследования возможностей нового пускового устройства изготовлена физическая модель с использованием асинхронного двигателя А02-42-4 ($P_{2н}=5,5$ кВт, $I_{1н}=11,3$ А, $U_{1н}=380$ В) и трансформатора с рабочим

напряжением, равным напряжению сети, и мощностью, соизмеримой с мощностью двигателя.

Показано, что оптимальным является применение трансформатора с напряжением питания, в 2-3 раза меньшим напряжения сети. По стоимостным показателям стоимость предлагаемых трансформаторно-тиристорного пускового устройства меньше в несколько раз стоимости полупроводниковых устройств пуска.

На основании проведенных исследований в цехах ОАО «ММК» даются рекомендации, о том, что мощность трансформатора может быть в 2-3 раза меньше, чем мощность пускаемого двигателя, при этом пусковой ток снижается в 1,5-2,5 раза (рисунок 14). Отдельно в главе рассматриваются вопросы, связанные с разработкой и анализом модели для высоковольтного двигателя, которая построена в пакете *Simulink* (среда *MatLab*) и его расширении *SimPowerSystems* на основе стандартных библиотечных блоков. Модель составлена для высоковольтного асинхронного двигателя ДАЗО-450У-4У1 ($P_H=800$ кВт, $U_H=6000$ В), которым оснащен вентилятор ВВН-20, и трансформатора ТМЗ ($S_H=630$ кВА, $U_I=3000$ В).

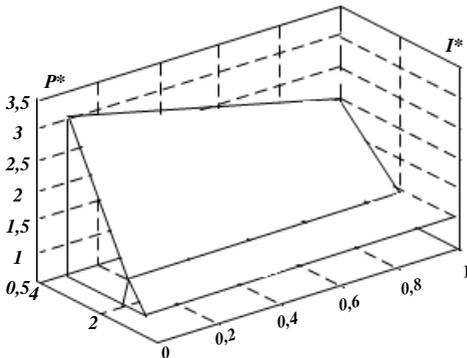


Рисунок 14 – Зависимость относительного превышения мощности АД к мощности пускового трансформатора P^* от относительного снижения пускового тока асинхронного двигателя I^*

Характер изменения тока во вторичной обмотке трансформатора аналогичен пусковому току двигателя. Это позволяет реализовать плавный пуск двигателя, используя обратную связь по току низковольтной вторичной обмотки трансформатора (рисунок 15).

В главе рассматривается возможность применения трансформаторных пусковых устройств. Приводится методика расчета трансформатора для пускового устройства, магнитопровод которого изготавливается из трех отрезков горячекатаной бесшовной стальной трубы, соединенных между собой металлическим швеллером при помощи электросварки. Поток энергии, проникающий внутрь цилиндрического сердечника через его поверхность, поглощается по мере проникновения в толщу металла, выделяясь в виде тепла.

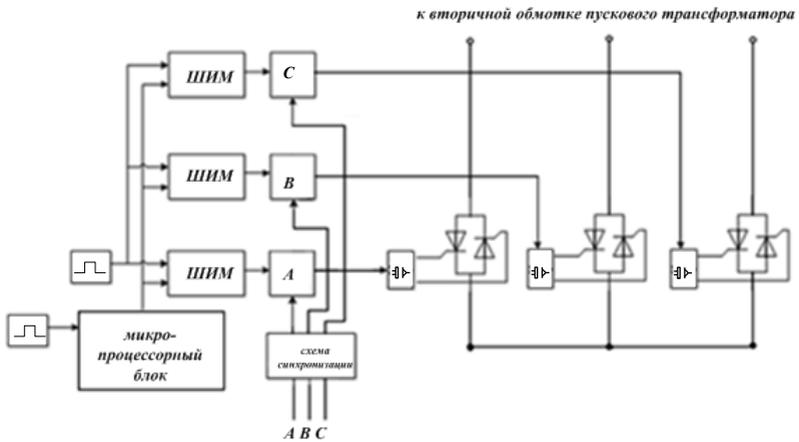


Рисунок 15 – Функциональная схема микропроцессорного блока системы управления гибридным трансформаторно-тиристорным пусковым устройством

Для проверки данной методики был изготовлен трансформатор, магнитная система которого состоит из трех отрезков горячекатаной трубы, соединенных швеллером. Он установлен в машинном зале ЦПАШ ГОП ОАО «ММК» и подключен к двигателю вентилятора мощностью 132 кВт. Процесс прямого пуска вентилятора и пуска с пусковым трансформатором представлен на рисунке 16. Как видно, пусковой ток уменьшается на 22 %, а время пуска увеличивается в 1,4 раза.

Исследования на двигателях напряжением 380 В позволили распространить этот способ пуска на высоковольтные двигатели. Для проверки работоспособности этого устройства на высоковольтных двигателях 10кВ, 630 кВт эксгаустеров ГОП ОАО «ММК» был предложен сухой силовой трансформатор с литой изоляцией мощностью 250кВт. Аналогичные трансформаторы использовались для пуска двух двигателей вытяжного вентилятора 630 кВт 6кВ цеха «Рудник» Гайского горно-обогатительного комбината и при реализации пусковой системы для четырех высоковольтных электродвигателей вентиляторов 630 кВт Новокаolinoвого ГОП напряжением 6кВ.

По проведенным исследованиям и расчетам мощность асинхронного двигателя может превышать мощность пускового трансформатора в 2,5-3 раза без перегрева последнего, при мощности трансформатора

меньше в 3-5 раза, пуск без автоматического регулирования невозможен по условиям нагрева пускового трансформатора.

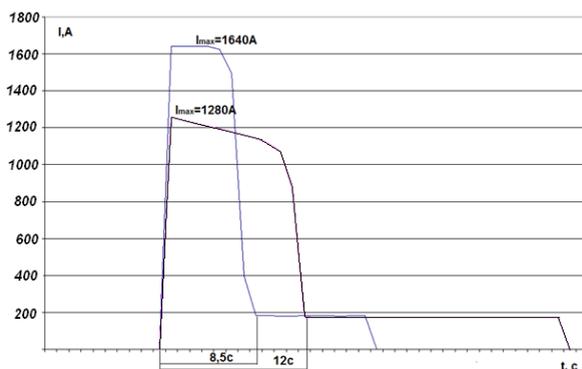


Рисунок 16 – Ток двигателя вентилятора при прямом пуске и с пусковым трансформатором

В шестой главе дана оценка научно-технических результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ технического состояния электроприводов переменного тока промышленности показал, что есть резервы для повышения показателей ресурсоэффективности при их эксплуатации. Отсутствуют научно обоснованные методики диагностирования электроприводов переменного тока, которые на ранней стадии обнаруживают дефект.

2. Разработанная методика диагностирования на основе концепции проактивного диагностирования оборудования, механизмов и электроприводов дает новый подход к реализации системы технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования, позволяющий выявлять на ранней стадии причины, вызывающие развитие дефектов. В предлагаемой методике используется метод, сочетающий вейвлет-преобразования с векторным анализом обобщенного вектора тока для анализа модельных и экспериментальных данных.

3. Разработаны проблемно-ориентированные модели состояний асинхронного двигателя. Для решения задачи нагрева асинхронной машины при пуске разработана конечно-элементная тепловая модель. На основе исследований тепловых процессов в асинхронной машине установлены дополнительные источники локального нагрева частей двигателя.

4. Разработаны и исследованы альтернативные малозатратные способы безударного пуска, такие как каскадный пуск. Исследования на модели и лабораторные исследования каскадного пуска показали, что в 2 раза

уменьшается кратность пускового момента, при этом происходит увеличение времени разгона примерно в 2,5-3 раза. Опыт эксплуатации каскадного пуска насосной станции с напряжением питания 400 В позволил распространить этот способ пуска на высоковольтные электропривода насосной станции напряжения 6 кВ, где принят в качестве основного способа пуска. Определены условия их технической реализации и области эффективного применения.

5. Разработаны комплексные математические модели АД в составе систем, реализующих способы безударного пуска. Предложенные математические модели позволяют выявлять возможности системы «трансформаторно-тиристорное пусковое устройство – высоковольтный асинхронный двигатель» в пусковых режимах с различными нагрузками.

6. Разработан новый класс пусковых устройств для высоковольтных асинхронных электроприводов, не требующих значительных экономических ресурсов при их реализации. Определено на модели и подтверждено экспериментально, что оптимальным вариантом для реализации пусковых устройств является использование в них трансформаторов с номинальным напряжением ниже напряжения сети, так для двигателей 10 кВ используется трансформатор на 6 кВ. Стоимость предложенного трансформаторно-тиристорного пускового устройства для высоковольтных двигателей не превышает 540 тыс. руб., что в 3-4 раза дешевле аналогичных пусковых устройств ведущих отечественных и зарубежных фирм.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и международных издательствах:

1. **Петушков, М.Ю.** Метод расчета электромагнитного момента для задач конечно-элементного моделирования асинхронного двигателя / А.С. Сарваров, М.Ю. Петушков, В.В.Купцов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. №14 (190). Серия «Энергетика» Вып.13. 2010. С.57-61.

2. **Петушков, М.Ю.** Метод расчета электромагнитного момента для моделирования асинхронного двигателя / А.С. Сарваров, М.Ю. Петушков, В.В. Купцов, А.М. Валяева// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып.3. Часть 1. Тула, 2010. С.172-177.

3. **Петушков, М.Ю.** Моделирование процесса детерминированного пуска АД на базе трансформаторно-тиристорного пускового устройства / А.С. Сарваров, М.Ю.Петушков, Д.М. Анисимов, И.А. Сарваров,

В.Б. Славгородский// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып.3. Часть 3. Тула, 2010. С.122-127.

4. **Петушков, М.Ю.** Сравнительная характеристика способов пуска машины центробежного литья валков /А.С. Сарваров, М.Ю. Петушков, Д.М. Анисимов, А.Д.Стригов, И.А.Сарваров// Известия Тульского государственного университета. Технические науки/ Вып.3. Часть 3. Тула, 2010. С.162-173.

5. **Петушков, М.Ю.** Разработка методики диагностирования обрыва стержня ротора АД по модулю обобщенного вектора тока/А.С. Сарваров, В.В.Купцов, М.Ю. Петушков. Известия Тульского государственного университета. Технические науки/ Вып.3/ Часть 3. Тула, 2010. С.67-71.

6. **Петушков, М.Ю.** Исследование парного пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором./ А.С. Сарваров, М.Ю. Петушков// Энергетика Татарстана. 2011.№1(21). С.37-41.

7. **Петушков, М.Ю.** Тепловая модель асинхронного двигателя/ М.Ю.Петушков// Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2011. №4. С.48-50.

8. **Петушков, М.Ю.** Исследование трансформаторного пускового устройства асинхронных двигателей/ М.Ю.Петушков// Фундаментальные исследования. 2011 №12 (часть 3). С.584-586.

9. **Петушков, М.Ю.** Метод расчета трансформаторного пускового устройства для асинхронного двигателя /Анисимов Д.М., Петушков М.Ю.// Электро. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность. 2012, №2. С.33-37.

10. **Петушков, М.Ю.** Анализ состояния электроприводов агрегатов ГОП ОАО «ММК» и пути модернизации.// Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Анисимов Д.М., Вечеркин М.В., Усатый Д.Ю.// Вестник Магнитогорского государственного технического университета им.Г.И.Носова. 2011. № 3(35).С.8-11.

11. **Петушков, М.Ю.** Возможности трансформаторно-тиристорной структуры как пускового устройства высоковольтных асинхронных двигателей// Вечеркин М.В., Петушков М.Ю., Сарваров А.С.// Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. № 1. С. 88-91.

12. **Петушков, М.Ю.** Причины и характер отказов асинхронных электродвигателей горно-обогатительного производства и пути их снижения.\\ Валяева А.М., Петушков М.Ю., Сарваров А.С.// Главный энергетик. 2013. № 9. С.19-22.

13. **Петушков, М.Ю.** Развитие спектрального анализа тока асинхронного двигателя для диагностирования/ М.Ю.Петушков// Главный энергетик. 2013. №9. С.60-65.

14. **Петушков, М.Ю.** Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования/ Лукьянов С.И., Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Сарваров А.С., Храмшин В.Р., Петушков М.Ю.// Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014.№ 1 (45). С. 129-136.

15. **Петушков, М.Ю.** Диагностика магнитной системы асинхронного двигателя/ Купцов В.В., Петушков М.Ю.// Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2015.№3. С.52-57.

16. **Петушков, М.Ю.** Оценка ресурсосбережения электрооборудования / Петушков М.Ю., Сарваров А.С., Федоров О.В.// Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2015.№3. С.24-28.

17. **Петушков, М.Ю.** Пути совершенствования энергосбережения средствами электропривода на металлургических предприятиях / Анисимов Д.М., Петушков М.Ю., Сарваров А.С., Сарваров И.А., Валяева А.М.// Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конференции. Т. 3. Одесса, 2009. С.62-68.

18. **Petushkov M. Y.** *A new approach to analysis of induction motors with rotor faults during startup based on the finite element method/ V. V. Kuptsov, A. S. Sarvarov, M. Y. Petushkov// Progress In Electromagnetics Research B, Vol.45, 269-290, 2012. URL <http://www.jpier.org/pierb/pier.php?paper=12082916>*

19. **Petushkov M.** *Analysis of defects in the rotor asynchronous motor during start //International Journal Of Applied And Fundamental Research. – 2013. № 1 URL: www.science-sd.com/452-24043.*

20. **Petushkov, M.** *Operational problems of modern electrotechnical systems at coldrolling and zinc-coated hotrolling facilities/Petushkov, M; Belousov, O ; Shcherbina, D// Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), 2014 International Conference on DOI: 10.1109/MEACS. 2014. 6986925 Publication Year: 2014 , Page(s): 1 - 4 IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS.*

21. **Петушков, М.Ю.** Сравнительная характеристика способов пуска асинхронных двигателей / А.С. Сарваров, М.Ю. Петушков, Д.М. Анисимов, А.Д.Стригов, И.А.Сарваров// Приводная техника. 2010. №6, С.26-33.

22. **Петушков, М.Ю.** Разработка трехмассовой тепловой модели асинхронного двигателя/ М.Ю.Петушков//Приводная техника. 2011/ №1(89). С.10-14.

Публикации в материалах международных конференций:

23. **Петушков, М.Ю.** Устройство для измерения индукции переменного поля/ Селиванов И.А., Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Завьялов Е.А., Серебренников А.Г.//«Электроприводы переменного тока ЭППТ-98» XI Науч.- техн. конф., 24-26 февраля 1998г.: Сб.тр.-Екатерин-бург 1998.- С.266-269.

24. **Петушков, М.Ю.** Исследование системы НПЧ-АД с программным формированием напряжения / Усатый Д.Ю., Евдокимов С.А., Петушков М.Ю., Радионов А.А., Сарваров А.С. Электроприводы переменного тока ЭППТ-01: Сб. тр. XII –ой Междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург: УГТУ, 2001. С. 46-48.

25. **Петушков, М.Ю.** Основные пути реализации энергосберегающих режимов в высоковольтных вентиляторных электроприводах / Петушков М.Ю., Усатый Д.Ю., Лекин А.Н., Маколов В.Н., Мазитов Д.М.// Труды III Международной (XIV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2001 (Нижний Новгород, 12-14 сентября 2001) / под ред. С.И. Хватова. Нижний Новгород: Вектор-ТиС. 2001. С.225-226.

26. **Петушков, М.Ю.** Модернизация волочильных станков с противонапряжением / Петушков М.Ю.// Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития» (Магнитогорск 14-17 сентября 2004). Часть 2. – Магнитогорск, 2004.-С.179-182.

27. **Петушков, М.Ю.** Разработка электропривода машины центробежного литья валков по системе ТПН–АД / Петушков М.Ю., Сарваров А.С., Стригов А.Д. //Материалы пятой Международной конференции по автоматизированному электроприводу «АЭП – 2007». С.Петербург. 2007. С. 347-350.

28. **Петушков, М.Ю.** Токовая диагностика как метод контроля технического состояния электроприводов переменного тока металлургического производства/ А.С. Сарваров, В.В.Купцов, М.Ю.Петушков// «Реконструкция промышленных предприятий - прорывные технологии в металлургии и машиностроении». Третий Международный промышленный форум Челябинск, 2010.-С.102.

29. **Петушков, М.Ю.** Моделирование пуска асинхронного двигателя / Валяева А.М., Петушков М.Ю.,Сарваров А.С., Сарваров И.А.// Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. научн.трудов III Всероссийской научно-технической конференции (с междуучастием)-Уфа: ИД «Чурагул» 2011, С.108-111.

30. **Петушков, М.Ю.** Методика диагностирования асинхронных двигателей в динамических режимах/ А.С. Сарваров, В.В. Купцов, М.Ю. Петушков//Электроприводы переменного тока ЭППТ-12, 12-16 марта 2012г.: Сб. тр.15-ой Междунар. науч.-техн. конф – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», 2012. – С. 217-219.

31. **Петушков, М.Ю.** Техничко-экономический аспект создания высоковольтных пусковых устройств кратковременного действия/ Петушков М.Ю., Сарваров А.С., Шевырев Ю.В., Федоров О.В.//Труды VII Межд. (VIII Всерос.) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу: ФГБОУ ВПО «ИГЭУ им. В.И. Ленина», Иваново, 2012 – С.390-392.

32. **Петушков, М.Ю.** К вопросу о тепловых моделях асинхронного двигателя/ Петушков М.Ю., Валяева А.М.//Труды VII Межд. (VIII Всерос.) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу: ФГБОУ ВПО «ИГЭУ им. В.И. Ленина», Иваново, 2012 – С.172-175.

33. **Petushkov M.** *Energy and resource saving starting devices for Asynchronous motors // Petushkov M, Sarvarov A. XVII CONGRESS Energy efficient, economically sound, Ecologically respectful, educationally enforced Electro-technologies, St.Petersburg, 21-25 may, 2012.*

Патенты и свидетельства об официальной регистрации программ:

34. А.с. № 2108593 СССР, МПК6 G01R 33/00. Устройство для измерения индукции переменного магнитного поля / Селиванов И.А, Петушков М.Ю., Завьялов Е.А., Сарваров А.С., Серебренников А.А. Оpubл. в Б.И. 1998, №10.

35. Пат. РФ на полезную модель №82963 H02P1/04 (2006.01) Пусковое устройство трехфазного высоковольтного электродвигателя переменного тока / Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Сарваров И.А., Анисимов Д.М. Оpubл. в Б.И. 10.05.09

36. Пат. РФ №2415507 МПК H02P 1/26 (2006.01). Способ пуска трехфазного высоковольтного электродвигателя переменного тока./ Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Сарваров И.А., Валяева А.М. Оpubл. 27.03.2011, №9.

37. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ №2010610103. Конечно-элементная модель асинхронного двигателя/ Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Купцов В.В. от 11.01.2010

38. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ №2011617249. Конечно-элементная тепловая модель асинхронного двигателя/Петушков М.Ю. от 19.09.2011.

Диссертант



Петушков М.Ю.

ПЕТУШКОВ МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать 15.12.2015г. Формат 60x84 1/16. Бумага тип.№1
Плоская печать Усл. печ. л. 2.00 Тираж 100 экз. Заказ №719.
455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38
Полиграфический участок МГТУ