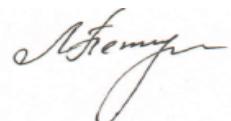


Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова»

На правах рукописи



ПЕТУШКОВ МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

Специальность 05.09.03. – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант
доктор технических наук,
профессор Сарваров А.С.

2015

Оглавление

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ.....	1
Введение	5
Глава 1. Анализ известных методов и технических решений повышения ресурсоэффективности асинхронных электроприводов ...	15
1.1. Анализ условий работы, причин и характеров отказов асинхронных электродвигателей	15
1.2. Обзор и анализ известных видов обслуживания асинхронных двигателей промышленных предприятий.....	26
1.3. Анализ методов диагностирования асинхронных двигателей .	34
1.4. Показатели надежности асинхронных двигателей. Критерии ресурсосбережения асинхронных двигателей.....	46
<u>1.5. Постановка задач диссертационной работы</u>	<u>50</u>
Выводы по главе 1	51
Глава 2. Разработка методики диагностирования для повышения ресурсоэффективности асинхронных электроприводов.....	53
2.1. Сущность концепции проактивного обслуживания асинхронных двигателей	53
2.2. Разработка методики диагностирования асинхронных двигателей на основе концепции проактивного обслуживания	56
2.3. Обоснование и выбор математического обеспечения для проактивного диагностирования асинхронных двигателей.....	63
2.4. Экспериментальная проверка метода спектрально токовой диагностики асинхронных двигателей	71
2.5. Развитие метода проактивного диагностирования асинхронных двигателей	74
Выводы по главе 2	84

Глава 3. Совершенствование и разработка тепловых моделей асинхронного двигателя для оценки ресурсосбережения	86
3.1. Разработка трехмассовой тепловой модели асинхронного двигателя	86
3.2. Разработка конечно-элементной тепловой модели	94
3.3. Эквивалентная тепловая схема асинхронного двигателя	98
3.4. Моделирование тепловых режимов асинхронного двигателя	102
3.5. Экспериментальные исследования тепловых режимов.....	112
3.6. Анализ влияния времени пуска и температурного режима обмоток на ресурс двигателя	115
Выводы по главе 3	119
Глава 4. Разработка новых способов и технических решений для повышения ресурсосбережения	121
4.1.Разработка каскадного способа пуска асинхронных двигателей	121
4.2. Математическая модель асинхронного двигателя при каскадном пуске.....	122
4.3. Моделирование каскадного способа пуска и их анализ	138
4.4. Экспериментальные исследования каскадного способа пуска	149
Выводы по главе 4	159
Глава 5. Разработка и исследование трансформаторно-тиристорных пусковых устройств для повышения ресурса асинхронных электроприводов.....	161
5.1. Обзор высоковольтных пусковых устройства для асинхронных электроприводов.....	161
5.2. Сущность трансформаторно-тиристорного пуска асинхронного двигателя. Силовые схемы трансформаторно-тиристорных пусковых устройств.....	168

5.3. Предварительные исследования трансформаторно-тиристорного пускового устройства	172
5.4. Оценка стоимости трансформаторно-тиристорного пускового устройства и затрат, связанных с его внедрением	174
5.5. Разработка математической модели трансформаторно-тиристорного пускового устройства.....	175
5.6. Исследование управляемого пуска асинхронного двигателя.....	192
5.7. Экспериментальные исследования системы трансформаторно-тиристорное пусковое устройство- асинхронный двигатель.....	200
5.8. Экспериментальные исследования трансформаторного пускового устройства.....	202
5.9. Гибридное трансформаторно-тиристорное пусковое устройство и его экспериментальные испытания.....	210
5.10. Расчет теплового режима трансформатора, применяемого для пусковых устройств	213
Выводы по главе 5	221
6. Оценка научно-технических результатов диссертационной работы	223
6.1. Научная новизна.....	223
6.2. Практическая значимость.....	223
6.3. Экономическая эффективность	225
6.4. Заключение.....	226
Список литературы (Библиографический список)	228
Приложение 1	251
Приложение 2	252
Приложение 3	253
Приложение 4	254
Приложение 5	255

ВВЕДЕНИЕ

Энерго – и ресурсосбережение является одним из приоритетных направлений научных исследований и технических разработок. Общество тратит огромные ресурсы на производство энергии, в том числе электрической. 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 них 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 электроснабжения.

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 и значительно сокращаются эксплуатационные расходы и вместе с ними материальные и другие ресурсы. Металлургическое производство является самым затратным по электропотреблению, 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 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. Недостаточно уделяется внимание изучению влияния устройствам 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 обусловлена 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 и недостаточно проводились исследования, связанные с созданием более простых, надежных и недорогих в реализации способов и устройств безударного пуска для высоковольтных электродвигателей переменного тока.

Отсутствие научно обоснованных методик диагностирования электроприводов переменного тока с целью обнаружения на ранней стадии развивающихся дефектов не позволяет выявить причины их возникновения и предотвратить аварии с тяжелыми последствиями. Многие причины снижения надежности эксплуатации обусловлены развитием дефектов, возникших в двигателях после многократных ремонтов, проведенных с нарушением технических условий.

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

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

Проведенный обзор состояния решений по важной научной проблеме, имеющей важное народнохозяйственное значение, которая связана с повышением ресурсоэффективности электроприводов переменного тока, указывает на необходимость развития концепции проактивного диагностирования в комплексе с разработкой новых методов, реализуемых на базе совре-

менных программно-аппаратных средств, а также создания современных пусковых средств 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 (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 ресур-

соэффициентности 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 исследований. 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 проводились 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 проводились 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.

2. База данных новых признаков дефектов, появляющихся при обработке токовых осцилограмм пуска АД на основе вейвлет-преобразований, позволяющие 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-тиристорное пусковое устройство – асинхронный двигатель», «трансформаторное пусковое устройство – асинхронный двигатель»;

5. Математическое, алгоритмическое и программное обеспечения 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. Моделировании типовых режимов электропривода с помощью разработанной модели показало результаты, аналогичные по характеру, и по количественным оценкам данным, которые получены при использовании известных методов моделирования. Применение трансформаторных пусковых устройств являет-

ся наименее затратным вариантом модернизации в условиях действующего производства. Практически реализованы 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 CWT 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 элек-

тродвигателем 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 «Ново-каолиновый 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 использоваться 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 «Электропривод и автоматизация промышленных установок».

Апробация работы. Результаты работы докладывались на: международных конференциях по электроприводам переменного тока ЭППТ-98, ЭППТ-01, ЭППТ-12 (Екатеринбург), IV, V-VIII международных (XIV, XV-XIX Всероссийских) конференциях по автоматизированному электроприводу (г. Нижний Новгород, 2001 г., г. Магнитогорск, 2004 г., г. Санкт-Петербург, 2007 г., г. Тула, 2010 г., г. Иваново, 2012 г., г. Саранск, 2014г.); XII международной научно-практической конференции «Современная техника и технология», г. Томск, 2006 г.; международной конференции «Электроэнергетика и Автоматизация в металлургии и машиностроении», Магнитогорск, 2008 г.; международной научно-практической конференции «Современные проблемы

и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании», г. Одесса (Украина), 2009 г.; международной научно-практической конференции «Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах», г. Пенза, 2010 г.; третьем и четвертом международном промышленном форуме «Реконструкция промышленных предприятий – прорывные технологии в металлургии и машиностроении», г. Челябинск, 2010 , 2011 г., всероссийской научно-технической конференции «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий» Electro-2011, г. Уфа, 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 (МГТУ), также других 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, пяти монографиях, двух патентах, патенте на полезную модель и двух 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 натурных 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 256 страниц.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ МЕТОДОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

1.1. Анализ условий работы, причин и характеров отказов асинхронных электродвигателей

При решении проблем ресурсо- и энергоэффективности электрооборудования, в частности систем электропривода промышленных предприятий, используют различные подходы. Эти подходы определяются как научными школами электропривода, так и отдельными исследователями. Следует отметить что, несмотря на отсутствие единого подхода к проблеме, решение которой имеет много показателей и факторов, усложняющих строгую её постановку, можно выделить два главных направления исследований:

- ресурсосбережение непосредственно электроприводов [1, 4];
- ресурсосбережение электропривода и технологических машин [26, 160].

При этом многие исследователи отмечают взаимосвязи между этими направлениями, которые отражают особенности, как систем электропривода, так и технологических нагрузок рабочих механизмов. Наряду с этим совершенно изолировано исследователи решают задачи ресурсосбережения, энергетической эффективности, надежности и определения расходов на обслуживание электрооборудования.

И это притом, что, например, в металлургической и горнодобывающей промышленности аварийность электрических двигателей колеблется от 30 до 70 % в год. Указанные показатели отличаются даже в случае однотипных предприятий или производств [8,31].

Немаловажным фактором является и то, что парк электрооборудования физически и морально устарел, но все еще эксплуатируется. Например, по данным [127] на ОАО «ММК» работают трансформаторы 1932 года выпуска, двигатели транспортеров 1930 и 1944 года выпуска. В этой связи актуальным

является необходимость определения с достаточной точностью его ресурса. На рисунке 1.1 приведена диаграмма распределения количества электродвигателей переменного тока ГОП ОАО «ММК» по году изготовления, из которого видно, что 59,3 % двигателей изготовлены до 2000 года.

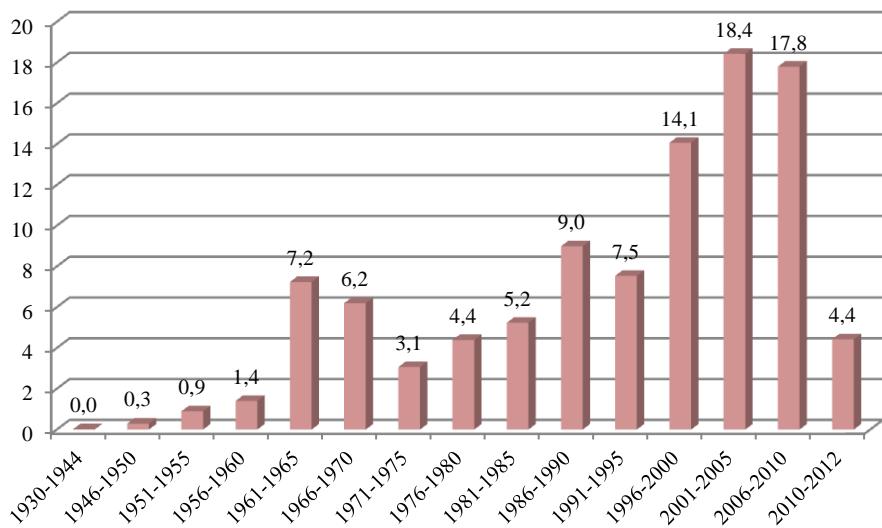


Рисунок 1.1. - Диаграмма распределения электродвигателей ГОП ОАО «ММК» по году изготовления

С учетом недогрузки электрических машин в нормальном технологическом режиме до 20-25 % и снижения объемов производства, затраты на ремонт двигателей (при наработке на отказ 4000 часов) соизмеримы со стоимостью электроэнергии, которую потребили бы двигатели за время эксплуатации между двумя ремонтами. С учетом транспортных и иных расходов, связанных с аварийным выходом двигателей из строя, удельные затраты на ремонт приближаются к затратам на приобретение и установку новых электрических машин. По данным электроремонтных служб происходит ежегодное увеличение стоимости ремонтов. Например, по сравнению с 2008 годом на ОАО «ММК» произошло увеличение стоимости ремонта на 14 % для маломощных двигателей и до 31 % для двигателей мощностью больше 90 кВт. При этом отмечается, что стоимость капитального ремонта для двигателей до 22кВт соизмерима со стоимостью нового двигателя [127].

Значительное влияние на ресурс электрических машин оказывают методы и устройства пуска. Существующие пусковые системы асинхронных

электроприводов, как правило, не универсальны и не могут учесть весь комплекс факторов, определяющих аварийность оборудования и влияние процесса пуска на его ресурс. Это обусловлено, прежде всего, особенностью работы асинхронных двигателей, а именно, тем что:

- высока кратность пускового тока (до $5-7I_n$);
- повышенный момент сопротивления при пуске приводит к повышенным динамическим усилиям в конструкции узлов системы «электродвигатель – технологический механизм» и, как следствие, к интенсивному износу и снижению ресурса электромеханического оборудования;
- возможны режимы стопорения при пуске двигателей переменного тока, которые приводят к механическим перегрузкам и перегреву обмоток и, соответственно, к ускоренному разрушению изоляционных материалов, нарушению балансировки ротора и др.;
- при пуске как асинхронных, так и синхронных двигателей наблюдается, снижение напряжения на шинах подстанций (особенно при запуске мощных двигателей), что приводит к недопустимым условиям эксплуатации других потребителей;
- тяжелые условия пуска приводят к перегрузкам и сокращению срока службы питающей кабельной линии, коммутационной аппаратуры и других элементов электроприводов.

Анализ литературных источников [57] показывает, что существенное снижение энергопотребления за счет широкого применения регулируемого электропривода, в настоящее время, мало реализуемо ввиду большого срока окупаемости его при реконструкции. Тенденция замены нерегулируемого электропривода на регулируемый, на наш взгляд, не всегда оправдано. Регулируемый электропривод должен применяться там, где это экономически целесообразно, а не повсеместно. Нужно использовать подход, предполагающий использование как регулируемого, так и нерегулируемого электропривода. Например, при регулировании процесса пуска можно обеспечить экономический эффект, достаточно близкий к наиболее совершенным приводам.

Следует учитывать и то, что при использовании регулируемого привода с высокими техническими характеристиками необходимо повышать уровень обслуживания электрооборудования. При этом следует иметь в виду, что указанные выше положительные свойства системы электропривода приобретает не за счет использования других технических средств, а за счет улучшенных регулировочных возможностей системы электропривода [4, 32].

При постановке задачи разработки и внедрения устройств, обеспечивающих снижение максимальных моментов и токов, возрастает роль устройств «мягкого» пуска электрических двигателей. Решение этой задачи способствует повышению ресурсосбережения как электроприводов, так и технологических механизмов. Исследования показывают, что применение пусковых систем, например, для насосных агрегатов, повышает время наработки на отказ электродвигателей до 25-30 %, а для двигателей рабочих колес центробежных насосов на 15-25 % [43, 104]. Поэтому разработка методов и устройств пуска, при введении ограничения на затраты, является весьма актуальной задачей.

Особенно сложен процесс пуска высоковольтных асинхронных двигателей (АД) [32]. Это еще раз подтверждает необходимость разработки новых методов и устройств именно для высоковольтных электрических двигателей. Пусковые системы представляют собой особый класс ресурсо – и энергосберегающего оборудования и неразрывно связаны с общей госпрограммой и частными задачами реализации энергосбережения [125]. Задачи ресурсосбережения могут быть решены с использованием пусковых устройств, обеспечивающих пуск двигателя при ограничениях токовых, механических и тепловых нагрузок. Исследование и анализ известных методов и устройств пуска позволяет выделить требования, которые предъявляются к ним:

- ограничение динамических токовых нагрузок;
- возможность увеличить число пусков в единицу времени без опасности перегрева обмоток двигателя;

- обеспечение необходимых пусковых условий для разных производственных механизмов, например, по максимальному моменту;
- возможность использования резервного оборудования;
- экономическая обоснованность системы пуска.

Выбор методов и устройств пуска определяются конкретными требованиями, вытекающими из технологического режима. Анализ асинхронных двигателей, которые участвуют в технологическом процессе, проведенный нами на горно-обогатительном производстве (ГОП) ОАО «ММК» позволяет построить диаграмму распределения двигателей по механизмам (рисунок 1.2) участвующих в технологическом процессе.

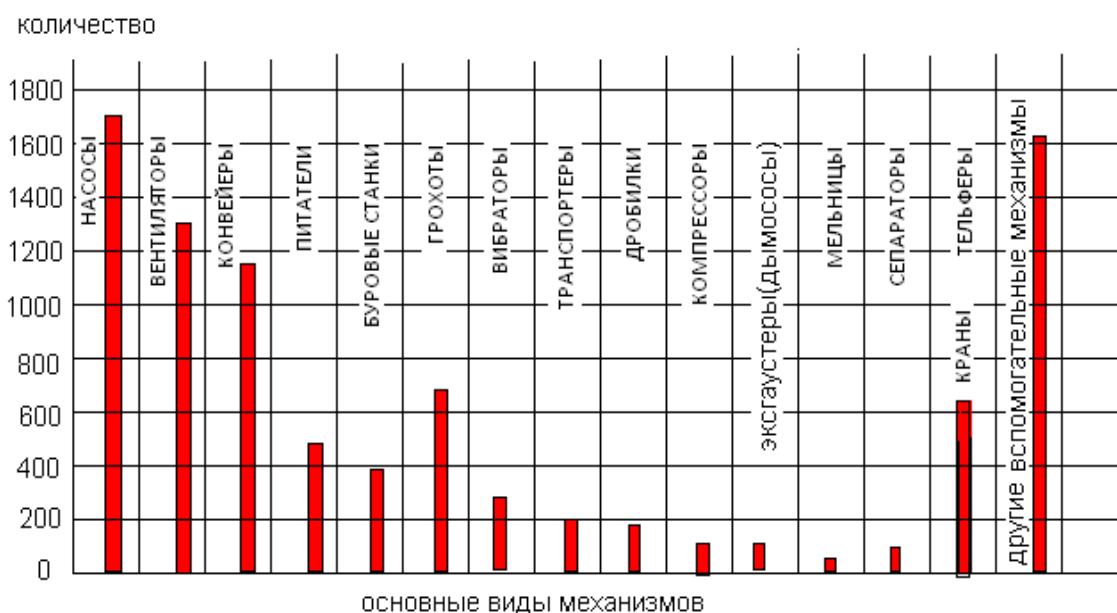


Рисунок 1.2. - Диаграмма распределения асинхронных электродвигателей по механизмам ГОП ОАО «ММК»

Наиболее массовыми в горнорудном производстве, как в целом в промышленности, являются насосы и вентиляторы (экскаваторы). В количественном отношении на долю механизмов данного типа приходится свыше 30% электрических машин.

Специфичными для ГОП являются буровые станки, конвейеры и транспортеры, грохоты и вибраторы, мельницы и дробилки, электроприводы которых реализованы на базе нерегулируемых короткозамкнутых АД. Следует отметить, что в настоящее время процесс модернизации электроприводов

произошел только в отношении питателей и непосредственно агломашин [127].

Тяжелые условия пуска асинхронных электроприводов обусловлены, как известно, возникновением ударных пусковых моментов колебательного характера и пусковых токов, амплитуды которых многократно превышают номинальные значения. Современные пусковые устройства на основе тиристорных преобразователей напряжения (ТПН) позволяют осуществить различные законы управления пусковым режимом, но во всех случаях пуск производится при ограничении питающего напряжения. При этом пусковой режим, в зависимости от закона регулирования напряжения, может быть длительным во времени и тогда выигрыша в плане снижения электрических потерь в самом двигателе при этом нет. При пуске двигателя с нагрузкой на валу длительность пускового процесса значительно возрастает, и, вместе с этим, заметно увеличиваются потери, которые в отдельных случаях могут привести к перегреву двигателя.

По условиям пуска электроприводы промышленных механизмов горно-обогатительного производства в целом можно разделить на три группы. Каждая из них характеризуется определенным типом нагрузочных характеристик. На рисунке 1.3 приведены три вида типовых характеристик. Вентиляторы и насосы относятся к первой группе механизмов, для которых условия пуска считаются нормальными, так как начальный момент сопротивления

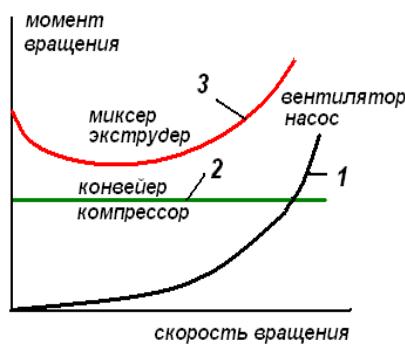


Рисунок 1.3. - Нагрузочные характеристики основных механизмов

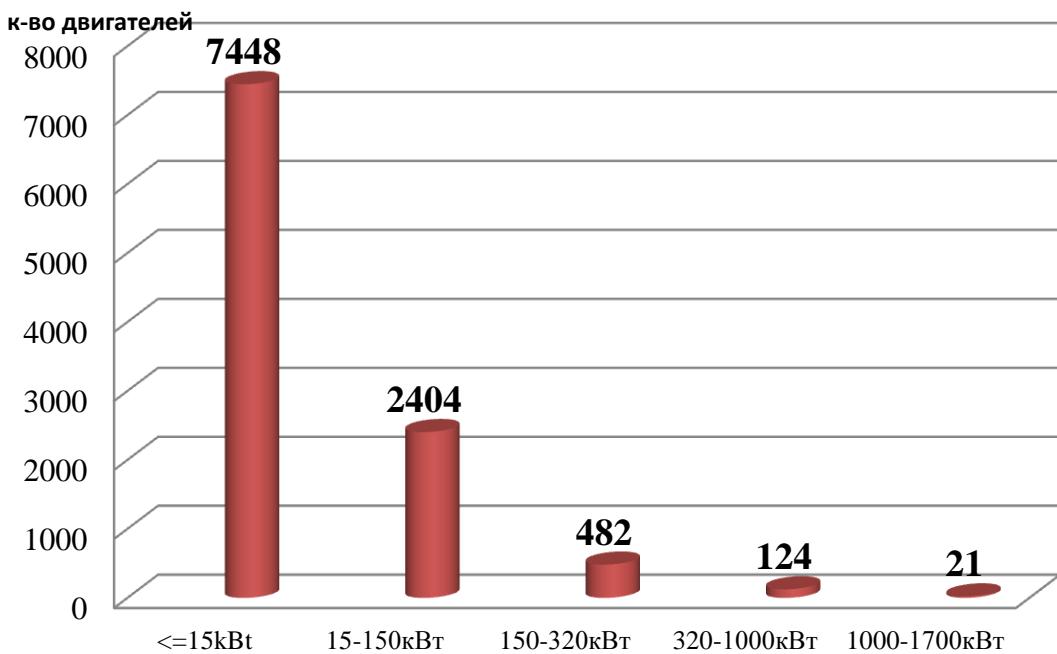


Рисунок 1.4. - Распределение двигателей ГОП ОАО «ММК» по мощности находится на уровне сопротивления холостого хода.

Электроприводы второй группы работают практически при постоянном моменте. К ним в первую очередь относятся конвейеры, подъемники, транспортеры и др. им подобные по виду механических характеристик. Для этой группы условия пуска следует считать тяжелыми.

Сверхтяжелыми считаются условия пуска 3-й группы механизмов. Особенности пуска таких механизмов следует рассматривать отдельно.

Общее число асинхронных двигателей на ГОП ОАО «ММК» 10489, высоковольтные составляют 3,7 % от общего числа, при этом их суммарная установленная мощность – 23,9 %. Диаграмма распределения асинхронных двигателей по мощности представлена на рисунке 1.4, а диаграмма распределения по напряжению питания и суммарной установленной мощности на рисунке 1.5.

Анализ аварийных ситуаций на предприятиях металлургического и горнорудного производства, выполненный в работе [127], позволяет говорить о негативном влиянии прямых пусков нерегулируемых электроприводов на

работоспособность электромеханического оборудования и технологических механизмов.

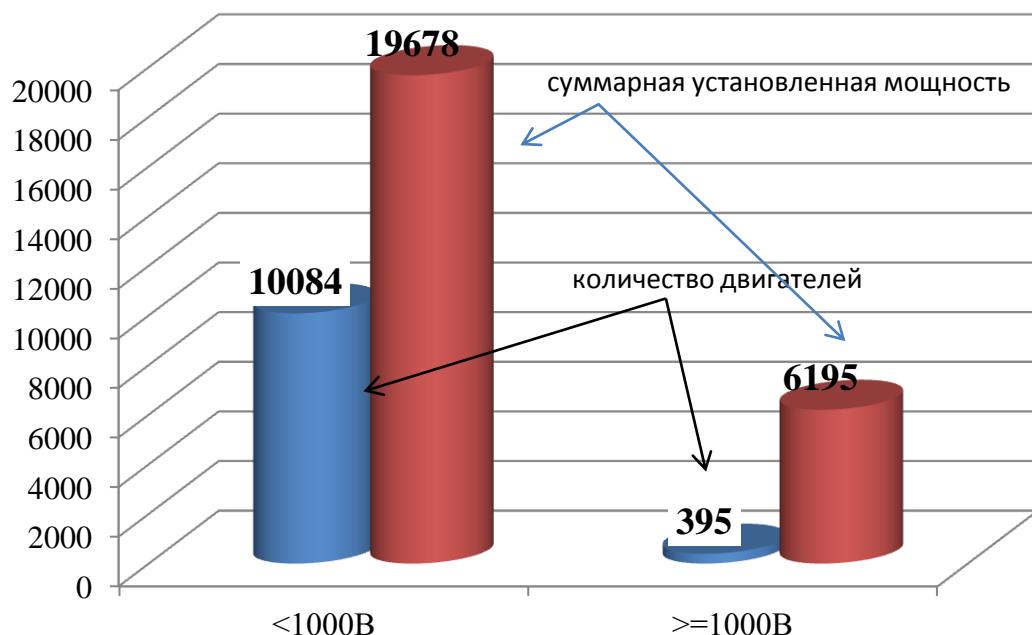


Рисунок 1.5.- Распределение двигателей ГОП ОАО «ММК» по напряжению питания и суммарной установленной мощности

Широкомасштабные исследования, проводимые кафедрой электроники и микроэлектроники ФГБОУ ВПО «МГТУ им.Г.И. Носова», показывают, что из-за перегрузок при пуске асинхронных двигателей (АД) вышли из строя на участке «Рудник» ГОП ОАО «ММК» в период 2005-2011 гг. высоковольтные АД экскаваторов типа ЭКГ – 49 единиц при парке 50. Исследование того же периода на горно-обогатительном комбинате г. Гай Оренбургской обл. показало, что 70 % от общего числа высоковольтных двигателей выходило из строя. Основные причины - разрушения статорной обмотки в процессе пуска и короткие замыкания в статоре.

Был проведен нами анализ аварийности насосного оборудования Магнитогорского ГОПа на дробильно-обогатительной фабрике (ДОФ5) и ВФУ, пуски которого характеризуются значительными моментами нагрузки из-за оседания минеральной составляющей перекачиваемой жидкости. Установлено, что увеличение числа пусков мощных электроприводов насосных агрегатов, обусловленное как неритмичной работой технологических линий,

так и силовым ограничением потребления электроэнергии со стороны энергосистемы, приводит к росту аварийности электрооборудования.

Соотношения аварийности электромеханического и технологического оборудования насосных станций системы оборотного водоснабжения таковы: 21% – выход из строя статорных и роторных обмоток электрических машин; 41% – перегрев подшипников; 14% – течь масла; 8% и 16% – капитальный и текущий ремонты соответственно. При этом более 50% аварийных ситуаций в системе оборотного водоснабжения происходит по причине частых пусков и остановов.

Установлено, что увеличение числа пусков мощных электроприводов насосных агрегатов, обусловленное как неритмичной работой технологических линий, так и силовым ограничением потребления электроэнергии со стороны энергосистемы, приводит к росту аварийности электрооборудования.

При изучении и анализе опубликованных данных позволяют нам говорить о схожести причин аварийности электрооборудования. Так, например, результаты наблюдений [104] прямых пусков под нагрузкой синхронных и асинхронных электроприводов землесосов НП-800, выполнявшихся с 1999 по 2003 г.г. на Полтавском ГОКе, показали, что при тяжелых пусках интенсивному износу подвергается не только электропривод, но и сам технологический механизм. Особенно на этапе разгона. При пусках на полный зумпф наблюдается: усталостное разрушение элементов конструкции – 25 %, нарушение центровки – 25 %, выход из строя подшипников – 20 %, течь масла и другие неисправности – 30 %.

Анализ аварийности [95] электрооборудования скребковых конвейеров показал, что высокая аварийность электромеханического и технологического оборудования обусловлена частыми стопорными режимами и пусками под нагрузкой. При этом, наиболее часто, встречаются следующие виды неисправностей электрооборудования: выход из строя АД – 45 %, отказ коммута-

ционной аппаратуры – 30 %, нарушение целостности изоляции силового кабеля – 25 %. К неисправностям технологического механизма следует отнести: сход цепи с направляющих – 30 %, разрыв муфт – 50 % и нарушение соединения скребков с цепью – 20 %.

Главным образом отказы асинхронных двигателей, мощностью свыше пяти киловатт, происходят: из-за: повреждения обмоток 85-95 %, 5-8 % отказов приходятся на подшипниковый узел и незначительный процент объединяют причины такие, как распайка выводных концов, скручивание валов, разрыв стержней ротора [43]. Причины отказов распределены следующим образом: технологические – около 35 %; эксплуатационные – 50 % и конструкционные – 15 % [42].

В среднем, в течение года капитально ремонтируется, в среднем, около 20 % установленных электрических машин (в строительстве – 50 %, в горнодобывающей промышленности – 30 %, в машиностроении – 20 %, в черной металлургии – 13 % и в химической промышленности – 9 %).

Можно провести деление всех неисправностей электрических машин на внешние и внутренние.

К внешним неисправностям относятся: обрыв одного или нескольких проводов, соединяющих машину с сетью, или неправильное соединение; перегорание плавкой вставки предохранителя; неисправности аппаратуры пуска или управления, пониженное или повышенное напряжение питающей сети; перегрузка машины; плохая вентиляция.

Внутренние неисправности электрических машин могут быть механическими и электрическими, которые, как правило, взаимосвязаны.

Механические повреждения: нарушение работы подшипников; деформация или поломка вала ротора; ослабление крепления сердечника статора к станине; обрыв или сползание проволочных бандажей роторов; трещины в подшипниковых щитах или в станине и др.

Электрические повреждения: межвитковые замыкания; обрывы в обмотках; пробой изоляции на корпус; старение изоляции; неправильные соединения в катушках и др. (рисунок 1.6):

1. Перегрузка или перегрев статора электродвигателя – 32%.
2. Межвитковое замыкание – 16%.
3. Повреждения подшипников – 13%.
4. Повреждение обмоток статора или изоляции – 12%.
5. Неравномерный воздушный зазор между статором и ротором – 9%.
6. Работа электродвигателя на двух фазах – 8%.
7. Обрыв или ослабление крепления стержней в беличьей клетке – 5%.
8. Ослабление крепления обмоток статора – 5%.
9. Дисбаланс ротора электродвигателя – 3%.
10. Несоосность валов – 2%.

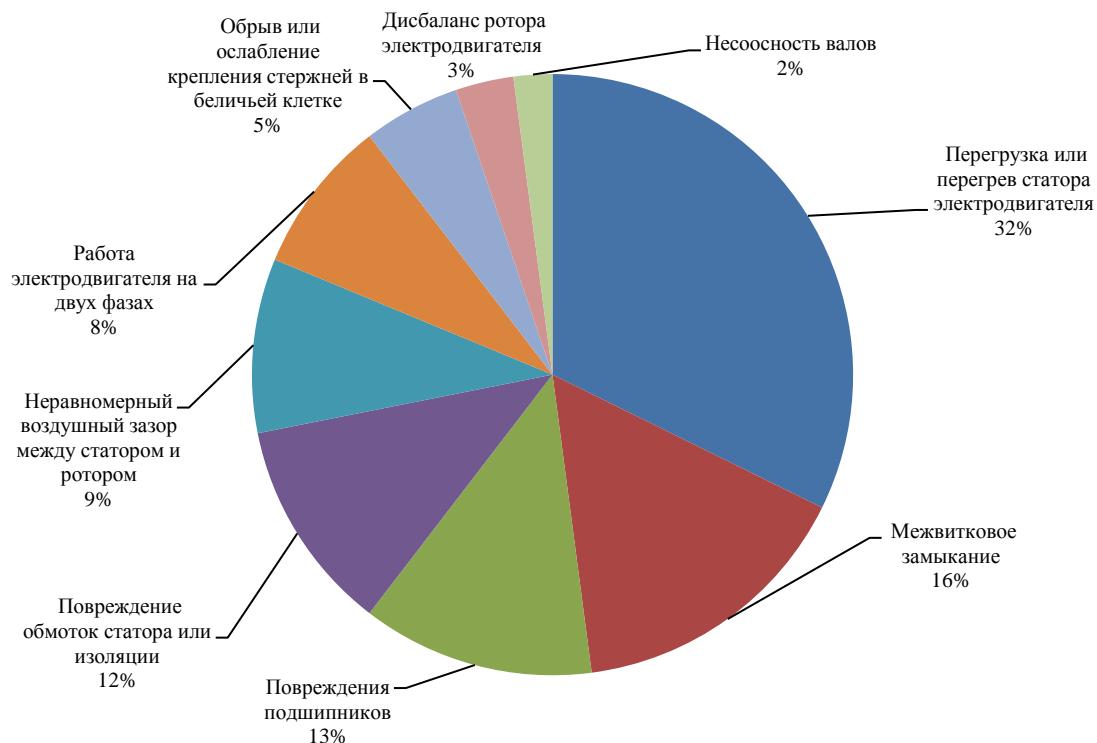


Рисунок 1.6.- Неисправности асинхронных двигателей

1.2. Обзор и анализ известных видов обслуживания асинхронных двигателей промышленных предприятий

На современном уровне развития технологий промышленных предприятий мы можем говорить о предъявлении высоких требований к надежности оборудования и повышению его ресурсоэффективности. Ресурсоэффективность оборудования основывается на применении современных способов и средств, а также новых методов диагностики и мониторинга с применением комплексного подхода к решению инженерно-технических задач.

Факторы ресурсоэффективности можно разделить на:

- технические;
- организационные;
- социально-экономические.

Социально-экономическая часть ресурсоэффективности базируется на:

- управлении ресурсами на основе современных методов менеджмента;
- анализе использования производственных ресурсов с применением нетривиальных методов микроэкономического анализа;
- разработке и применении методики анализа эффективности использования ресурсов и рейтинга ресурсоэффективности;
- проведении работ в области нормирования затрат, внедрение наиболее прогрессивных;
- планомерной работе в области повышения квалификации персонала;
- стимулировании экономии ресурсов с помощью как финансовых, так и нефинансовых рычагов (психологическая мотивация, корпоративная ответственность, принадлежность к прогрессирующему производственному коллективу).

Организационная составляющая базируется на:

- совершенствовании организации учета использования ресурсов;
- разработке и внедрении организационно-технических мероприятий по экономии потребляемых ресурсов (электроэнергии, комплектующих и расходных материалов и т.д.);

- разработке и внедрении рационализаторских предложений по повышению производительности труда и организации безотходного производства;
- пересмотре технологий с определением возможностей замены ручного труда автоматизированным;
- реализации системы управления ресурсосбережением.

Техническая составляющая определяется как:

- применение оборудования, позволяющего оптимально расходовать ресурсы с минимальными потерями – ресурсосберегающего оборудования;
- содержание ресурсосберегающего оборудования в работоспособном состоянии;
- внедрение высокотехнологичного оборудования с наиболее производительными характеристиками;
- улучшение качества ремонта узлов запасных частей;
- применение технологий восстановления ремонтопригодных узлов для продления ресурса;
- внедрение мониторинга и контроля технологического процесса.

Если организационные и социально-экономические составляющие ресурсосбережения в рамках данной работы мы не рассматриваем, то на ряд факторов технической составляющей направлена наша работа, а именно на поддержание оборудования в работоспособном состоянии. В тоже время работоспособное состояние определяется системой технического обслуживания и ремонта (ТОиР).

Усилия системы технического обслуживания и ремонта должны быть направлены на повышение коэффициента использования оборудования, который согласно ГОСТ 13377-75 рассчитывается по следующей формуле:

$$\kappa_t = t_{\text{сум}} / (t_n + t_{\text{то}}), \quad (1.1)$$

где $t_{\text{сум}}$ – наработка в часах;

$t_{\text{пп}}$, $t_{\text{то}}$ – время всех простоев, вызванное необходимостью ремонта и технического обслуживания объекта.

Как следует из этой формулы, для того, чтобы повысить коэффициент использования оборудования k_T , необходимо увеличить наработку на отказ при уменьшении времени простоев оборудования, как при ремонтных работах, так и при необходимом техническом обслуживании. Замечено [94], что чем выше качество проведенного технического обслуживания, тем меньшее количество ремонтов необходимо провести, и, соответственно, чем выше качество проведенного ремонта, тем больше продолжительность межремонтного периода.

Обеспечение надежной работы любого оборудования, в том числе и предприятий горно-обогатительного производства, в течение срока службы и более требует: правильного выбора конструкции оборудования, соответствующей его установки, надлежащей эксплуатации, проведение диагностирования (мониторинга). При этом в случае сбоя или отказа, должны иметь возможность исследовать причину и применять мероприятия, направленные на предотвращения повторения ситуации. Для электропривода который: правильно установлен; динамически сбалансирован; расположен на фундаменте, выполненным по правилам эксплуатации; имеющий соосность, не превышающую допустимую; обеспечен смазкой, согласно регламента; а также: пускается; используется по назначению; тормозится; все координаты электропривода не превышают номинальные значения; и если персонал проводит мониторинг, редко происходит аварийный отказ.

Во время проведения исследований как на ГОП ОАО «ММК», так и Гайский ГОК и др. мы не раз сталкивались с ситуацией, что часто электроприводы: эксплуатируют с перегрузками, как кратковременными, так и длительными; с низким КПД; установлены на «мягких» опорных плитах; работают с не допустимой расцентровкой валов; и т.д. По этой причине мы предлагаем использовать концепцию проактивного обслуживания электроприводов при эксплуатационных и сервисных (ремонтных) работах, которая хорошо

может согласоваться с циклом Деминга PDCA (Plan — Do — Check — Analyze) или, как его еще называют, «планируй — делай — проверяй — анализируй» [13]. Выделяя в этой концепции проблему ресурсосбережения, определяют, прежде всего, следующие моменты: локализуют и исследуют факторы, вызвавшие возникновение дефекта; проводят мероприятия по определению его расположения диагностическими средствами; планируют предупреждающие действия, для исключения возникновения подобного дефекта в будущем, как на этом оборудовании, так и на подобных [124]. Коэффициент использования оборудования при этом не только поддерживается на значении, отмеченном в паспорте, но и повышается при эксплуатации оборудования, что повышает эксплуатационную рентабельность. Таким образом, возникает задача разработки под каждый вид оборудования отдельных мероприятий и программ, начиная с расчета экономической целесообразности внедрения методов технической диагностики, т.е. обоснование выбора или функциональной, или тестовой диагностики. Исходя из метода диагностирования, необходимо обеспечить или разработать соответствующий подбор функциональных приборов и диагностических систем, и это все должно заканчивать поставкой оборудования и обучением работы на нем.

На сегодняшний день можно выделить четыре формы технического обслуживания (рисунок 1.6) [124] – реактивное, планово-профилактическое, обслуживание по фактическому состоянию и проактивное. На конечную стоимость затрат на производство работ, связанных с техническим обслуживанием и ремонтом влияет выбор формы организации системы обслуживания.



Рисунок 1.6. - Характерные особенности форм технического обслуживания

Первые три формы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) описаны в литературе достаточно подробно и применяются практически на всех предприятиях, даже обслуживание по фактическому состоянию.

Но система планово-предупредительного обслуживания (ППР) остается наиболее распространенной среди предприятий горнодобывающей промышленности. Причины различны [211]:

- 1) многолетнее использование планово-предупредительного обслуживания дает уменьшение эксплуатационных затрат при сравнении с системой реактивного обслуживания (по разным литературным источникам от 12 до 45%);
- 2) система ППР хорошо отработана, имеет развитую методологическую основу, что позволяет ей поддерживать на заданном уровне исправность и работоспособность оборудования;
- 3) у руководителей предприятий недостаточно информации о современных системах ТОиР, а также, что наиболее характерно для предприятий, недостаточно квалификации обслуживающего персонала и ремонтных

служб, а также аппаратного и инструментального оборудования для производства работ;

4) система ППР поддерживается как изготовителями различного оборудования, так и персоналом организации эксплуатирующей его.

При проведении обслуживания по состоянию, сдерживающим фактором является отсутствие плановой системы диагностирования. По результатам диагностирования и контроля должны приниматься решения о необходимости ТО, а значит, остановки всего технологического процесса и согласование со всеми заинтересованными службами, как времени его проведения и объеме (кто и что заменяет), а так и о сроках проведения следующего контрольного определения технического состояния.

Для реализации ТО по состоянию определяющим фактором становятся затраты на проведение диагностирования с обязательным прогнозированием. В связи с этим применяют такой вид ТО тогда, когда этот метод экономически выгоден и обеспечен ресурсами. Условиями для применения обслуживания по состоянию являются:

- контролепригодность оборудования;
- наличие методик определения состояния объектов и прогнозирование его развития;
- наличие диагностических приборов или систем диагностирования;
- наличие программного обеспечения, способного определять состояние объекта;
- персонал, обученный работе на данном диагностическом оборудовании;
- экономическая целесообразность методов диагностирования.

В практике контроля технического состояния электроприводов промышленного производства нашли применения такие системы технической диагностики и неразрушающего контроля (ТД и НК) [124] как:

1) системы измерения ударных импульсов в подшипниковых узлах;

- 2) системы центровки валов электронно-механическим или лазерным оборудованием;
- 3) системы измерения общего уровня вибрации или анализа спектра роторных машин;
- 4) пиromетрические системы (измерение температуры – контактное и бесконтактное);
- 5) системы для эндоскопического обследования при визуальном контроле;
- 6) системы для определения состояния масел и смазок (вязкость, содержание воды и механических примесей);
- 7) системы дефектоскопии и толщинометрии стенок сосудов, труб и корпусных конструкций;
- 8) системы для измерения сопротивления изоляции кабелей и обмоток электрических машин, трансформаторов;
- 9) системы для анализа состава газов и так далее.

ТО по состоянию будет эффективно, если правильно определена стратегия диагностирования и корректно назначены допустимые уровни и параметры. Эта система не будет работать при отсутствии элемента системы ТО по состоянию - службы технической диагностики. Задачи службы заключаются в выполнении плановых обследований объектов, проведении внепланового диагностирования, участие в выходном контроле при приемке из ремонта, а также выдача рекомендаций по обслуживанию и прогнозированию. Наиболее эффективным методом, по мнению ряда авторов, в настоящее время, является метод прогнозирования технического состояния, повышающий эксплуатационную надежность оборудования.

Переход на обслуживание электроприводов «по состоянию» позволит [124]:

- знать реальное техническое состояние оборудования и определять качество его ремонта;
- уменьшить финансовые и трудовые затраты при эксплуатации оборудования;

- продлить межремонтный период и увеличить срок службы механизмов;
- сократить количество запасных частей, материалов;
- сократить число «внезапных» поломок механизмов и остановок производства;
- планировать сроки и меру технического обслуживания и ремонта;
- повысить общую культуру производства и квалификацию персонала.

В тоже время распространять этот вид обслуживания на целый ряд электроприводов и механизмов горно-обогатительного производства экономически может быть необоснован, и не обеспечен квалифицированным персоналом.

Рассмотрим еще один из перспективных видов обслуживания - проактивное или предотвращающее обслуживание.

Проактивное техническое обслуживание — комплекс мер, нацеленных на обеспечение максимально возможного межремонтного срока эксплуатации оборудования за счет применения современных технологий обнаружения отказов на ранней стадии их развития, и проведения соответствующих корректирующих мероприятий [183]. Это обслуживание включает в себя все методы прогнозирующего и профилактического обслуживания (рисунок 1.7), известные ранее. Используя анализ причин возникновения отказа, чтобы не только своевременно обнаруживать, но и точно определять возникающие дефекты, с гарантией, что выполнен своевременный анализ и даны рекомендации по устранению дефектов, чтобы по возможности устраниить повторение дефекта.

Достоинство подхода в том, что эффективность его возрастает от ремонта к ремонту, так как персонал приобретает новые знания, навыки, а это все приводит к сокращению времени по обслуживанию, а значит и увеличению межремонтного срока эксплуатации. Программа, основанная на прогнозирующем обслуживании, предполагает, что ремонт оборудования проводится поэтапно. Это дает время на закупку необходимых материалов и

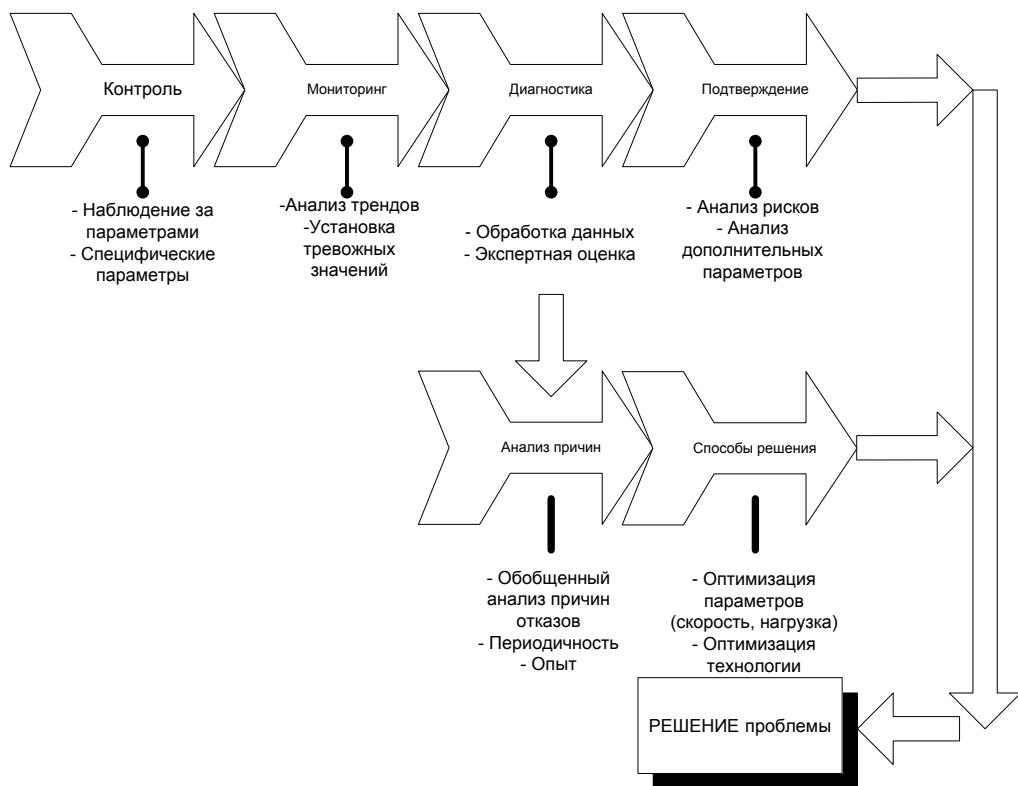


Рисунок 1.7. - Составляющие проактивного обслуживания

комплектующих для ремонта, что уменьшает количество запасных частей. В практике технического обслуживания в мире это самая распространенная форма ТОиР. Отметим также, что такой формы ТОиР на российских предприятиях практически нет [124].

1.3. Анализ методов диагностирования асинхронных двигателей

Диагностику асинхронных машин проводят методами либо тестового и либо функционального диагностирования. Как следует из этих разных по своей сути методов, тестовое диагностирование основывается на анализе откликов тестируемого объекта на подачу на его вход внешних тестовых воздействий. При этом машина выводится из технологического процесса.

Функциональная диагностика основывается на анализе координат машины, не нарушая технологический процесс. Исторически сложилось, что наибольшее распространение в практике распознавания возможных дефектов получило функциональное диагностирование машин [44, 48, 98-102].

Как показано [99], на форму магнитного потока в воздушном зазоре влияют любые неисправности в двигателе. В связи с этим, представляется

перспективным, для выявления многих отклонений от нормального или «идеального» состояния электрической машины, пространственный гармонический анализ внутреннего и внешнего магнитных полей [7, 15, 100, 139]. Предлагаемый метод в работе [100], заключающийся в выявлении с помощью точечных индукционных преобразователей магнитного поля с одной парой полюсов из многополюсного магнитного поля асинхронного двигателя, что позволит проводить диагностику короткозамкнутой обмотки ротора в любом режиме работы и позволяет выявлять дефект в повреждении стержней ротора. Также существует метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе определения зависимости составляющих внешнего магнитного поля от степени развития дефектов, который описан в работе [15]. Метод, представленный в [7], базируются на анализе аксиального потока двигателя. Используя этот метод, можно определять межвитковые замыкания обмотки статора, для этого используется катушка, которая концентрически намотана вокруг вала двигателя. Дисбаланс ротора, как показано в работе [147], определяется методом, основанным на измерении поля рассеяния при включении и выключении двигателя с помощью индуктивных датчиков магнитного поля. Анализ внешнего магнитного поля двигателя, как показано в работе [212], позволяет контролировать качество заливки короткозамкнутых роторов. Общий недостаток описанных выше методов мы видим в том, что требуется измерение магнитного поля с применением специальных датчиков, которые необходимо установить на объект диагностирования. По технологическим или организационным причинам это сделать сложно, не говоря уже о последующей организации проведения мониторинга.

Как показывает анализ отечественного и зарубежного опыта, для обнаружения возможных дефектов эффективным является контроль параметров вибрации систем с вращательным движением силовых узлов [36, 39]. До 75% дефектов выявляется на основе методов виброакустики. Огромная информационная емкостью виброакустических процессов позволяет с высокой эффективностью обнаруживать неисправности, которые сопровождают работу

любого технологического оборудования и имеют высокую чувствительность виброакустических сигналов к любому изменению частоты колебаний электротехнического комплекса, которые вызываются проявлением различных дефектов.

Как показывает практика, снижение уровня вибрации на 50 % продлевает общий ресурс оборудования в 2 раза. При превышении пороговых значений, как следствие, происходит ускоренное снижение свойств механических деталей. Выявление и устранение причин появления повышенной вибрации приводит к продлению срока межремонтного цикла и снижению затрат на его ремонт.

Определим те узлы, которые являются источником вибрации, и могут наиболее полно и достоверно диагностироваться по сигналу вибрации. Можно выделить, прежде всего, подшипники качения и скольжения машин, роторы, редукторы, колеса насосов и турбин, а также электромагнитную систему электрической машины.

Наличие адаптированного программного обеспечения и современные датчики при применении виброакустических методов позволяют, на данном этапе развития диагностики, с большой степенью вероятности выявлять дефекты в шарикоподшипниках (внешней и внутренней обоймы, сепаратора, тел качения, отсутствие смазки в них и т.д.), ослабление и разбалтывание опор, смещение и эксцентризитет валов, дефекты в электромагнитной системе электродвигателя (обрыв фаз статора в асинхронном двигателе, неравномерность воздушного зазора) и т. д.

Недостаток методов вибродиагностики заключается, прежде всего, в высокой стоимости диагностического оборудования и, как требуют методы, установке датчиков на объект диагностирования, что ведет к определенным организационным и техническим трудностям.

Известны методы диагностирования, которые основаны на том, что любое изменение в форме магнитного потока воздушного зазора двигателя, которое вызвано проявлением неисправности, влияет на форму потребляе-

мого тока. Большое количество зарубежных и отечественных авторов рассматривают методы диагностики асинхронных двигателей по спектру потребляемого тока [5, 13, 205, 110-111, 157, 177, 201-201, 207-209, 211, 215]. Развитие этих методов приводит к тому что, можно использовать не статорные токи, а вычисленные из них величины, которые могут определенным образом характеризовать поведение машины. Спектральный анализ потребляемой двигателем активной мощности используется для диагностики статорной обмотки [174]. Работа [139] посвящена диагностике эксцентрикитета и обрыва стержней ротора в асинхронных электродвигателях методом, основанным на сопоставлении величин третьей гармоники в фазных токах обмоток статора. В работах [6, 126] предлагается метод контроля неисправностей ротора АД с короткозамкнутым ротором основанный на измерении под нагрузкой пульсаций потребляемой активной и реактивной мощности и вычислении обобщенного вектора тока статора, электромагнитного момента и скольжения. Проводить анализ несимметрии полных сопротивлений обмоток статора, в работе [134] предлагается диагностировать повреждения в обмотках статора асинхронных двигателей. Если сравнивать методы диагностики, которые основаны на контроле параметров магнитного поля и вибрации двигателя с методами диагностирования, основанными на анализе токов и напряжений двигателя, то последние по своим организационным мероприятиям не требуют непосредственного доступа к двигателю и использования специфических датчиков. Все необходимые измерения проводятся в щите электропитания электродвигателя.

Для методов функциональной диагностики асинхронных двигателей можно провести классификацию по тем режимам работы, в которых реализуется сбор данных для диагностирования. Как правило, основа функционального диагностирования это анализ изменения в спектральном составе токов и напряжений асинхронного двигателя при возникновении в нем дефектов. Под этим подразумевается, что во время сбора диагностических данных необходим статический режим работы электродвигателя, то есть неизмен-

ность как частоты напряжения питания, так и нагрузки на валу. При этом необходимо, чтобы длительность статического режима составляла не менее 10-100 секунд, и прежде всего, зависит от требуемого разрешения спектра [39,111]. В тоже время ряд электроприводов постоянно работает в динамических режимах (пуски, торможения, ударные приложения нагрузки), для них не всегда удается выделить статические режимы работы, необходимые по длительности для проведения диагностики. А в ряде работ отмечается, что переходные режимы работы асинхронного двигателя проявляют более характерные диагностические признаки дефектов, не проявляющиеся в статических режимах работы. Особенно их появление можно наблюдать при бросках статорных токов или больших динамических нагрузках. Поэтому для оценки технического состояния электроприводов предлагается рассматривать характеристики переходных режимов работы электродвигателя.

На основании изложенного выше сформулируем выводы по дальнейшему построению новых систем для функциональной диагностики асинхронных электроприводов:

1. В качестве диагностических величин, которые характеризуют работу электропривода, рационально использовать координаты, 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 датчика скорости необходимо по структуре системы автоматического управления технологическими процессами.

2. На сегодняшний день имеется возможность диагностировать асинхронные электродвигатели по их токам и напряжениям статора. Эти методы обладают своими достоинствами и недостатками и эффективны, как правило, при классификации некоторого дефекта для определенного режима работы электропривода. Представляется уместным вести разработку автоматизированной системы функциональной диагностики асинхронных электроприводов на основе нескольких методов, каждый из которых направлен на поиск

дефектов в различных режимах работы. Сопоставляя и анализируя результаты, которые получены разными методами и в разных режимах работы, возможно прогнозировать состояние электропривода и, тем самым, увеличить межремонтные сроки, иными словами, построить систему проактивного диагностирования.

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

1.3.1. Принципы диагностики асинхронного двигателя

Как известно, асинхронная машина считается симметричной, и любая неисправность в ней порождает ту или иную асимметрию. Различают электрическую, магнитную и пространственную несимметрии в теории несимметрических электрических машин [120]. Для двигателей, у которых различаются активные или индуктивные сопротивления фаз, например, при межвитковых замыканиях в статорных обмотках, возникает электрическая несимметрия. Неравномерный воздушный зазор проявляется в электрических машинах с магнитной асимметрией, а в некоторых случаях и с несимметричным магнитопроводом. Если оси обмоток у соседних фаз сдвинуты на угол, отличающийся от $2\pi/m$ электрических радиан, то в двигателе имеется пространственная асимметрия. Это связано с особенностями конструктивного исполнения двигателя и не является следствием неисправностей в нем.

В воздушном зазоре рабочей электрической машины в идеальном случае присутствует только одно магнитное поле, которое круговое и синусоидальное. В несимметричной машине, если имеется симметричное синусоидальное напряжение питания, а также, как и в симметричной машине, но при

напряжении питания несимметричном в машине наблюдается магнитное поле, которое приблизительно имеет вид эллипса. В воздушном зазоре такой машины присутствуют два синусоидальных поля, вращающихся в противоположных направлениях с одинаковой скоростью. Как правило, амплитуды прямого и обратного полей не равны между собой, а если поле пульсирующее, то они равны. Если обратного поля нет, в электрической машине присутствует только круговое поле.

На рисунке 1.8 показано круговое магнитное поле ротора исправного двигателя (рисунок 1.8.а) и поле ротора с дефектом (отгорел стержень ротора рисунок 1.8.б) [111]. Эллиптическое поле ротора с неисправным стержнем может представлено в виде суммы прямого B_f и обратного B_b полей, при этом прямое поле аналогично полю ротора, не имеющего неисправностей.

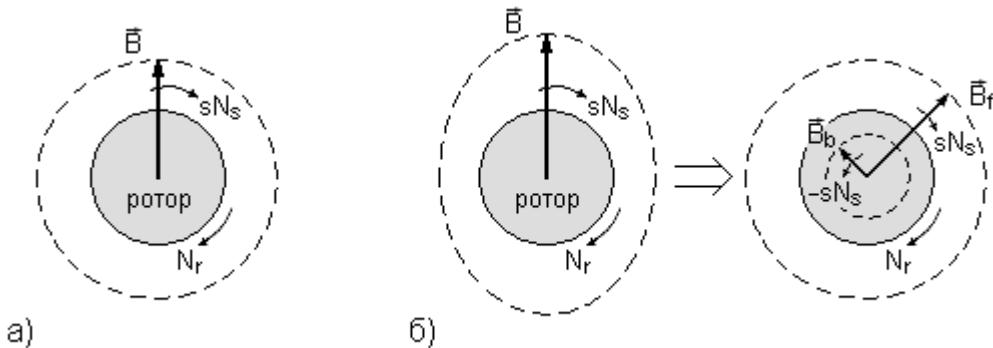


Рисунок 1.8. - Магнитное поле ротора,
а – исправного двигателя; б – имеющего дефект

Скорость вращения поля статора относительно скорости ротора определяется как разность $\omega_0 - \omega$, где ω – скорость вращения ротора, ω_0 – скорость вращения поля статора. Частота тока ротора, который наводит поле статора, определяется как:

$$2\pi f_2 = (\omega_0 - \omega) \cdot p = s \cdot \omega_0 \cdot p = 2\pi s \cdot f_1,$$

где p – число пар полюсов, s – скольжение, f_1 – частота сети.

При этом магнитное поле ротора будет вращаться со скоростью $\omega_2 = s \omega_0$.

Как можно заметить, относительно неподвижного статора, скорость вращения поля ротора определяется скоростью вращения поля статора:

$$\omega + \omega_2 = \omega + s \cdot \omega_0 = \omega + (\omega_0 - \omega) = \omega_0.$$

Таким образом, в идеальных случаях в статорных обмотках исправного асинхронного двигателя нет дополнительных составляющих тока.

При повреждениях ротора, возникает обратное магнитное поле, которое будет вращаться в противоположную сторону по отношению к вращению ротора, и его скорость определяется относительно неподвижного статора как:

$$\omega_b = \omega - \omega_2 = \omega - s \cdot \omega_0 = \omega_0(1 - s) - s \cdot \omega_0 = \omega_0(1 - 2s). \quad (1.1)$$

Это поле наводит в статорных обмотках дополнительную составляющую тока частотой:

$$f_b = \omega_0(1 - 2s)p = (f_l/p) \cdot (1 - 2s)p = f_l(1 - 2s). \quad (1.2)$$

Асимметрия поля ротора приводит к колебаниям скорости и момента двигателя, и появляется еще одна составляющая тока статора с частотой

$$f_l(1 + 2s).$$

Повреждения в роторе асинхронного двигателя могут быть выявлены обнаружением в спектре тока статора двух составляющих тока на частотах

$$f_l(1 \pm 2s).$$

1.3.2. Проблемы диагностики обмоток роторов

Как правило, доля неисправностей в роторе составляет 5-10% отказов в асинхронных двигателях [100, 135]. Это небольшая величина, но для некоторых производственных механизмов эта цифра существенно возрастает. К такому типу электропривода можно отнести двигатели рольгангов прокатных станов, где преимущественно всегда имеет место повышенная температура окружающей среды от транспортируемого металла и дополнительно происходит нагрев ротора за счет частых пусков и торможений. В этих условиях зачастую происходит подвижка короткозамкнутой клетки ротора, отмечаются трещины в пазах стержней или их полные разрывы [118]. Повреждения в роторе одна из наиболее сложно диагностируемых неисправностей, особенно на ранних стадиях, а дальнейшая эксплуатация двигателя с поврежденным ротором может привести к серьезным вторичным повреждениям, например задеванию ротора о статор.

Характер дефектов в короткозамкнутой обмотке ротора обусловлен технологией изготовления и материалом, который используется. В двигателях мощностью до 100 кВт, в настоящее время, «беличья клетка» ротора выполняется, заливкой в пазы расплавленного алюминия под давлением [50]. Одновременно со стержнями происходит заливка короткозамкнутых колец и вентиляционных лопаток. Для двигателей большей мощности ротор чаще выполняется из меди, латуни или алюминия, путем сваривания отдельных элементов между собой[84]. Типичными повреждениями и дефектами литой обмотки являются разрывы в короткозамкнутом кольце, обрывы стержней в пазах. Кроме того появляются дефекты, присущие литью, такие как возникновение раковин и пустот. Для сварной обмотки характерны: ослабления или нарушения контактов между стержнем и кольцом, обрывы или подгары в стержнях.

Еще одной причиной повреждений в роторах являются разные коэффициенты линейного расширения материалов короткозамкнутой клетки и электротехнической стали, из которой изготавливают ротор. При нагреве и охлаждении стержни клеток могут отрываться от стенок паза. Такое явление может наблюдаться у двигателей, которые работают в режимах с частыми пусками и динамическими торможениями, у механизмов, которые по технологическим условиям требуется, как быстро запустить, так и остановить.

Для клеток, изготовленных из медных и, особенно из латунных стержней, со временем наблюдается «разъедание» стенки паза, а сами стержни уменьшаются геометрически. Клетка из этих материалов при этом смещается в сторону, возникает так называемая, горообразная деформация в стержнях, это приводит к возрастанию вибрации ротора, и, как следствие, нарушение контактов в месте пайки стержней и короткозамкнутого кольца.

Потери при эксплуатации электродвигателей с поврежденными короткозамкнутыми роторами выражаются в повышении расхода электроэнергии и появлении дополнительных электромагнитных помех. Так в работе [100] показано, что расход электроэнергии возрастает на 1,06 %, 2,19 % и 3,75 % при

повреждении одного, двух и трёх стержней ротора для двигателя АОЛ 2-11-4, а повышение расхода электроэнергии приводит, в свою очередь к дополнительному нагреву двигателя.

Повреждения короткозамкнутой обмотки ротора приводят к необратимым для двигателя дополнительным дефектам. Асимметрия магнитного потока ротора приводит к появлению дополнительной силы одностороннего магнитного притяжения и, как следствие, усилению вибрации, что приводит к увеличению износа подшипников качения [84].

Также известные способы определения дефектов в короткозамкнутом роторе, которые основаны на внешнем осмотре, при проведении ремонта двигателя и по вибрации ферромагнитной пластины установленной на поверхности частично выдвинутого ротора [75].

1.3.3. Спектральный анализ тока двигателя

Спектральный анализ тока двигателя (Motor current signature analysis (MCSA)) [189, 196, 210] – методика, традиционно используемая для диагностирования обрывов стержней ротора в асинхронных двигателях. MCSA, главным образом, основывается на анализе статорных токов в статическом режиме работы с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) и на данный момент признан стандартом в диагностике. Обрывы стержней ротора в асинхронном двигателе приводят к появлению определенных дополнительных составляющих в обмотках статора. Наиболее значимы из составляющих - левая и правая боковые гармоники, и частоты их определяются как [179, 190]:

$$f_{rotorbar} = f_l(1 \pm 2s), \quad (1.3)$$

где s – скольжение двигателя,

f_l – частота питающей сети.

Однако, если скорость или момент нагрузки непостоянны, БПФ может давать неверный результат, что делает невозможным применение данного метода к двигателям, работающим, главным образом, в переходных режимах. Более того, методы, применяемые в статических режимах, не способны вы-

являть обрывы стержней ротора при работе двигателя с пониженной нагрузкой.

Для разрешения данных трудностей и расширения области применения MCSA был предложен ряд новых подходов, основанных на анализе пусковых режимов работы асинхронного двигателя [171, 182, 187]. Во время пуска скольжение двигателя изменяется в широких пределах, что позволяет достаточно просто выявлять наличие в токе дополнительных составляющих, вызванных неисправностями ротора. Кроме того, двигатель во время пуска подвержен значительным динамическим нагрузкам. Следовательно, в таких случаях подобные методы способны давать достоверную информацию о состоянии ротора независимо от нагрузки на валу двигателя.

Ключевым моментом для повышения достоверности методов, основанных на анализе нестационарных режимов работы, является всестороннее понимание влияния обрывов стержней ротора на статорные токи двигателя. В случае обрыва стержня ротора, поведение асинхронного двигателя может быть рассмотрено, на основе использования принципа суперпозиции, представленным Deleroi [197]. Согласно данному подходу, неисправный двигатель может рассматриваться как суперпозиция двух конфигураций: двигатель в исправном состоянии плюс двигатель с источником тока, включенным в поврежденный стержень, так, чтобы значение тока в нем было равно току в том же стержне исправного двигателя, но противоположно по направлению. Суммарный ток, протекающий в стержне, таким образом, равен нулю. Ток источника тока создает магнитное поле, которое приводит к появлению в статорных обмотках дополнительных гармоник тока, которые используются для диагностики дефектного стержня. Основываясь на данном факте, в [201] предложен метод, позволяющий приблизительно оценить изменение левой боковой гармоники во время пуска в асинхронном двигателе с обрывом стержня ротора. Однако в данном методе не учитываются насыщение магнитопровода и вытеснение тока в стержнях ротора, оказывающих существенное влияние на процесс пуска. Следовательно, точность данного метода не-

достаточна для глубокого изучения физических процессов, протекающих в двигателе при дефекте ротора. В работе [170] представлены результаты конечно-элементного анализа и проверки применимости принципа суперпозиции для случая ненасыщенного двигателя (с постоянным значением коэффициента намагничивания) и для случая двигателя с насыщенным магнитопроводом. Но в данном исследовании, рассматривающем работу двигателя только в статическом режиме, не затрагиваются переходные режимы.

Моделирование асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при обрыве стержней ротора широко освещено в литературе. Среди прочих методов рассмотрим метод time-stepping finite element (TSFE) он обладает наибольшей точностью, так как основан на точном повторении геометрии машины и истинной природе электромагнитных процессов, имеющих место в асинхронном двигателе.

В [191] нами представлен новый подход для точной оценки влияния обрывов стержней ротора на статорные токи асинхронного двигателя в процессе пуска путем непосредственного расчета составляющих тока, вызванных неисправностью ротора. Новизна данного подхода заключается в использовании метода конечных элементов для повышения точности расчетов совместно с принципом суперпозиции. Представленные в статье изменения, примененные к теореме о принципе суперпозиции, для учета насыщения магнитопровода и вытеснения тока в стержнях ротора так же не были опубликованы ранее. Данные изменения позволяют использовать принцип суперпозиции, который в общем виде справедлив только для линейных систем и для нелинейного моделирования. Еще один вопрос, который возникает при этом, адекватность результатов и проверка применимости модифицированного принципа суперпозиции для процесса пуска с учетом насыщения и вытеснения тока.

1.4. Показатели надежности асинхронных двигателей. Критерии ресурсосбережения асинхронных двигателей

Повышение надежности и долговечности асинхронных двигателей обеспечивает большой технико-экономический эффект в различных отраслях народного хозяйства. Основными показателями надежности асинхронных двигателей являются интенсивность отказов и вероятность безотказной работы. Для двигателей современной конструкции и новой технологии изготовления вероятность их безотказной работы за время 10 тыс. ч составляет 0,95 [26]. Как известно, показатель долговечности асинхронных двигателей определяется его гамма-процентным ресурсом. Для двигателей, эксплуатирующихся в настоящее время, он составляет 20 тыс. ч с вероятностью 0,9.

Асинхронный двигатель – изделие ремонтируемое. Однако при отказе обмотки статора, требующей полной ее перемотки, стоимость ремонта, как это было показано выше, примерно равна стоимости изготовления нового электродвигателя. Поэтому в случае такого отказа, асинхронный двигатель с экономической точки зрения можно рассматривать как неремонтируемое изделие.

Одним из основных показателей надежности двигателей является интенсивность отказов

$$\lambda(t) = n_{\text{отк}}(t)/(N_{\text{ср}}\Delta t) \quad (1.2)$$

Этот показатель определяется по статистическим данным при испытаниях на надежность как отношение количества отказавших двигателей $n_{\text{отк}}(t)$ к среднему количеству $N_{\text{ср}}$, исправно работавших в течение интервала времени Δt . Мероприятия, направленные на повышение ресурсоэффективности эксплуатации асинхронных двигателей, связаны с увеличением межремонтного периода и, следовательно, Δt . Ресурсоэффективность можно характеризовать снижением величины интенсивности отказов.

В процессе эксплуатации интенсивность отказов $\lambda(t)$ асинхронных двигателей изменяется по кривой (рисунок 1.9). Эту кривую можно разбить на три характерных периода. Первый период от 0 до t_1 , называют периодом

приработки. В этот период отказывают электродвигатели, имеющие скрытые производственные дефекты, не выявленные при техническом контроле на заводе-изготовителе. По мере выявления этих дефектов интенсивность отказов $\lambda(t)$ постепенно уменьшается до некоторого постоянного значения. Если двигатель в начальный период эксплуатации участвовал в приработочных испытаниях, то этот участок может отсутствовать.

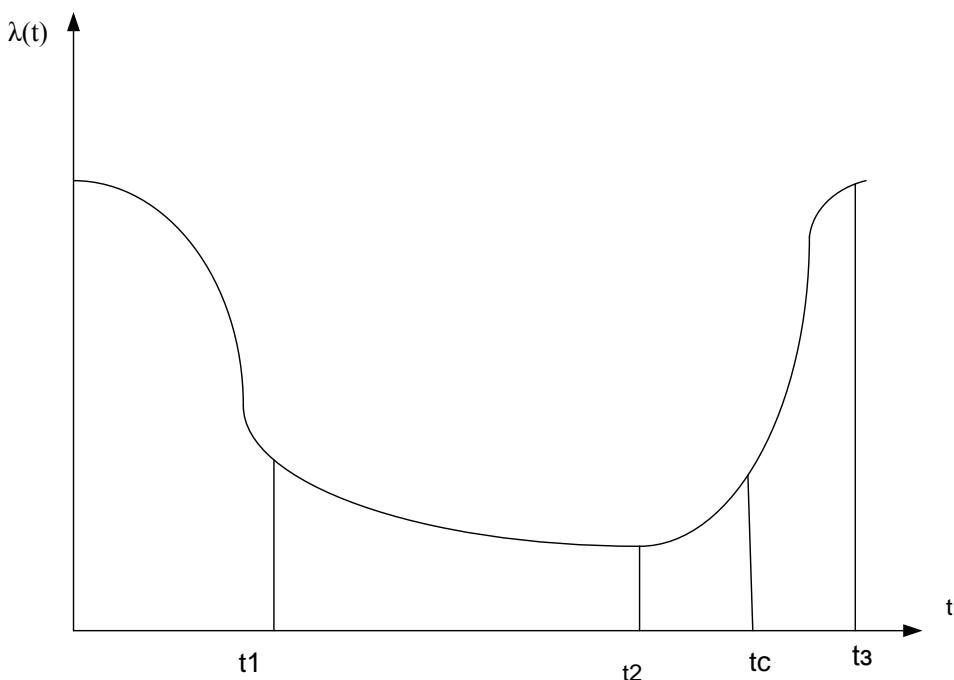


Рисунок 1.9. - Зависимость интенсивности отказов от времени наработки

Далее в период нормальной эксплуатации от t_1 до t_2 главной причиной отказов являются: аварии; недопустимые перегрузки; неправильные условия эксплуатации и т. п. В этот период, скрытые дефекты уже проявились, при этом старение изоляции незначительно, двигатели могут выходить из строя из-за повреждения обмоток, если они недостаточно защищены от проникновения влаги или если имеет место большая скорость нарастания температуры, при заторможенном роторе.

В течение периода от t_2 до t_3 отказы вызываются в основном износом и старением элементов двигателя. Этому участку кривой изменения $\lambda(t)$ соответствует нормальный закон распределения вероятностей отказов. Ресурс двигателя рассчитывается до времени t_c , т. е. до момента интенсивного износа.

са и старения элементов конструкции. Основное влияние на интенсивность отказов в рассматриваемом периоде оказывает температура изоляции обмотки статора и ротора (в двигателях с фазным ротором), которая определяет интенсивность ее старения. Снижение температуры нагрева изоляции двигателя повышает срок их службы, но снижение температуры в номинальном режиме работы неоправданно, так как электромашиностроительные заводы выпускают двигатели с превышением температуры в номинальном режиме на 7...10°C для повышения их надежности. Само превышение температуры установлено для крайне редкой в эксплуатации температуры окружающей среды +40°C. Нагрузка асинхронных двигателей в процессе эксплуатации, как правило, ниже номинальных. Так, например, двигатели насосов и вентиляторов загружены в основном на 70...75%, а двигатели станочных электроприводов – только на 20%.

Для оценки отказов, возникающих в результате износа, часто используют также логарифмически нормальное распределение, при котором логарифм вероятности отказа $Q(t)$ за время t (т. е. вероятность того, что время работы t двигателя меньше некоторого заданного времени τ – заданной наработки) распределен по нормальному закону.

Вероятность безотказной работы для двигателей серии АИ за время 10 тыс. ч составляет 0,95, т. е. надежность их значительно больше по сравнению с машинами предыдущих серий. Это достигнуто путем повышения класса нагревостойкости изоляционных материалов и механической прочности эмальпроводов, снижением вибрации, применением рациональной технологии изготовления. Для обеспечения надежной защиты двигателей серии АИ скорость нарастания температуры при заторможенном роторе у них снижена до 10°C/с. Расширено применение встроенной температурной защиты.

Долговечность двигателей характеризуется, в том числе, и гамма-процентным ресурсом (T_γ), т. е. наработкой машины до первого отказа с вероятностью $\gamma(\%)$.

По условиям эксплуатации двигателя в номинальных режимах при температуре, которая близка к допустимой для данного класса нагревостойкости системы изоляции, гамма-процентный ресурс асинхронных двигателей установлен 20 тыс. ч; он определяется техническим ресурсом обмотки статора. На рисунке 1.10 показаны кривая изменения вероятности безотказной работы $P(t)$ от времени t . Гамма-процентный ресурс определяется как время работы двигателя T_γ при установленном значении $\gamma(\%)$.

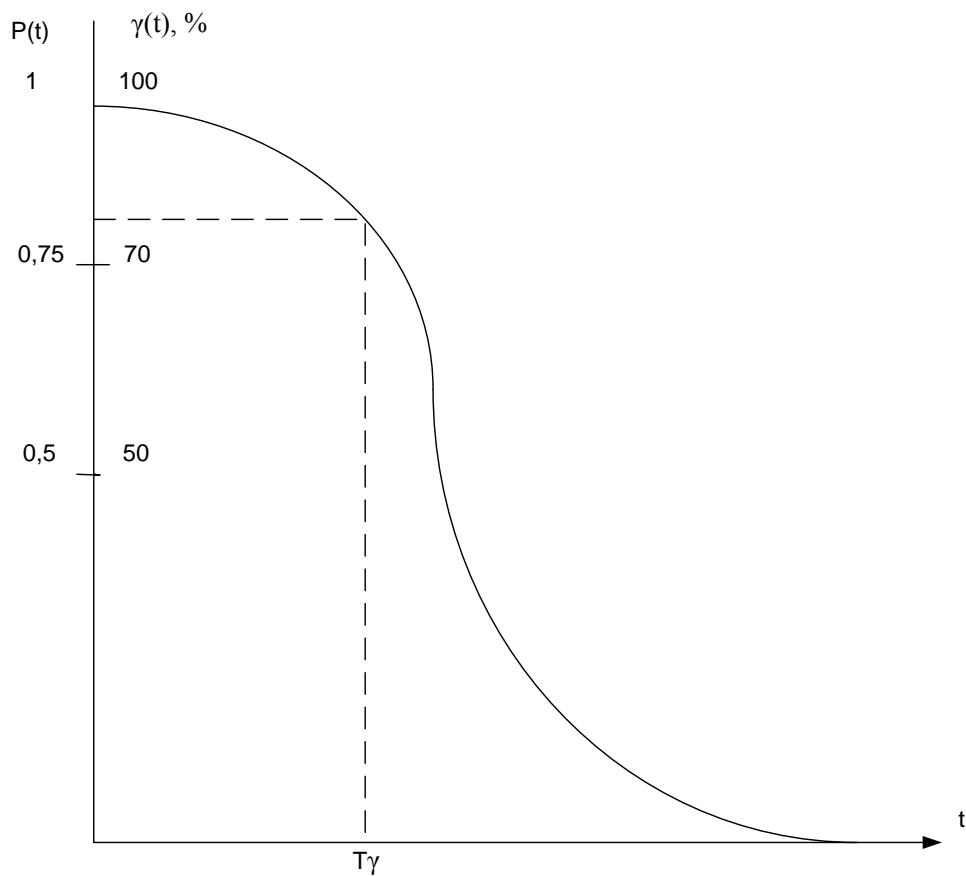


Рисунок 1.10. - Зависимость вероятности безотказной работы от времени

Для двигателей серии 4А гамма-процентный ресурс составляет 20 тыс. ч с вероятностью 0,8...0,85, а для двигателей серии АИ — с вероятностью 0,9. Эти показатели надежности и долговечности двигателей заводы-изготовители гарантируют, если они работают в режимах, близких к номинальному при температуре, не превышающей допустимую, число пусков соответствует режимам работы, соблюдены условия размещения, отсутству-

ют механические воздействия и др., а также, при обеспечении надлежащей защиты от перегрузок и других аварийных процессов. Иными словами, при соблюдении правил эксплуатации и технического обслуживания.

1.5. Постановка задач диссертационной работы

Для решения задачи повышения ресурсоэффективности эксплуатации высоковольтных асинхронных электроприводов в работе были поставлены следующие 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.

Выводы по главе 1

1. Снижение производительности производственных установок приводит к снижению ресурса электроприводов по целому ряду факторов, так или иначе связанных с числом пуска электрических двигателей.

2. 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.

3. Создание пусковых устройств для высоковольтных асинхронных двигателей является сложной задачей. Пусковые системы по своей сути представляют собой особый класс ресурсо- и энергосберегающего оборудования и тесно связаны с общей и частными задачами реализации ресурсосбережения.

4. Использование систем «мягкого» пуска 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.

5. Большинство отказов асинхронных двигателей мощностью свыше пяти киловатт происходят из-за повреждения обмоток (85-95%), на подшипниковый узел приходится 5-8% отказов и меньше одного процента обусловленных причинами, вызванными распайкой выводных концов, скручиванием валов, разрывом стержней ротора. При этом причины отказов распределены следующим образом: технологические – около 35%; эксплуатационные – 50% и конструкционные – 15%.

6. По условиям пуска электроприводы промышленных механизмов горно-обогатительного производства можно разделить на три группы, и каждая из них характеризуется определенным типом механических характеристик. Вентиляторы и насосы относятся к первой группе механизмов, для ко-

торых 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 др. им подобные по виду механических характеристик. Для этой группы условия пуска следует считать тяжелыми. Сверхтяжелыми считаются условия пуска 3-й группы механизмов.

7. Показано, что с ростом числа пусков, срок службы изоляции уменьшается в большей степени. Поэтому в большинстве случаев стремятся сократить число пусков двигателей, несмотря на увеличение расходов электроэнергии за счет работы вхолостую. Снижая кратность пускового тока можно существенно увеличить срок службы изоляции, тем самым увеличивая межремонтные сроки и повышая ресурс двигателя.

8. Для определения вида технического обслуживания электроприводов и механизмов любого производства возникает задача разработки для каждого типа оборудования своей программы, основываясь на экономической целесообразности внедрения методов функциональной диагностики, подбора приборов и определения класса дефектов, и обучением персонала на предприятии данной отрасли.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

2.1. Сущность концепции проактивного обслуживания асинхронных двигателей

Предлагаемая нами методика диагностирования оборудования механизмов и электроприводов промышленного производства на основе концепции проактивного обслуживания, это системный подход к внедрению системы технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования, основанный на всестороннем исследовании, как причин, связанных в физической природой отказов, так и решения проблем в организационной структуре. Разработанный алгоритм решения проблемы повышения ресурсоэффективности оборудования позволит получить результаты, повышающие производительность труда, фондоотдачу и материалоемкость продукции.

После анализа форм технического обслуживания можно сделать вывод, что в зависимости от специфики предприятия и отрасли должны использоваться все формы ТО в различных сочетаниях, что позволяет, достичь максимального значения экономического эффекта.

При проведении в 2012 г. первого этапа технического аудита на Ново каолиновом горно-обогатительном комбинате Челябинской обл., позволил выявить следующее:

Все основные причины выхода из строя электрооборудования можно разделить на две группы:

1-я группа

Закупка продукции несоответствующего качества (оборудование-электродвигатели, трансформаторы; расходные материалы - подшипники, инструмент, смазка и пр.) – 43%.

Нарушение требований эксплуатации (по допустимой нагрузке, по превышению температуры, прочие параметры) – 19%.

Несоответствие требованиям хранения в складских помещениях, неправильная консервация продукции, хранящейся на складе – 12%.

Неудовлетворительное текущее обслуживание и ремонт оборудования (несоблюдение соосности, остаточный дисбаланс, проведение ремонтов без специального оборудования и инструментов) – 26%.

2-я группа

Несоблюдение правил монтажно-демонтажных работ (подшипниковых узлов, узлов крепления и фундаментов) – 44%.

Деградация материалов (естественный износ) – 5%.

Низкий входной/выходной контроль – 9%.

Нехватка технических специалистов – 27%.

Социально-производственные факторы – 15%.

За 100% взято 100 единиц оборудования. После проведения аудита установлено, что даже новое оборудование, которое установлено силами обслуживающего персонала ГОП, имеет низкий начальный коэффициент надежности по факторам 1-ой группы.

Основные этапы концепции

Предлагаемая нами концепция состоит из шести этапов. Каждый из них основан на решении задачи предыдущего уровня с целью ее развития и повышения ресурсоэффективности.

Этап 1. Выявление «узких» мест производства

Определение путей повышения ресурсоэффективности оборудования является основным на данном этапе, так как они определяют тот экономический эффект, который может быть получен от внедрения программы.

Индивидуальный подход при решении проблемы определения «узких» мест обеспечивается инструментарием, применяемым для их выявления. В качестве инструментария может быть использована комплексная оценка, которая проводится техническими аудиторами.

В качестве исследуемых моментов может быть произведен анализ:

- технического состояния электрооборудования;

- причин, приводящих оборудование в неработоспособное состояние;
- уровня оборудования, используемого для технического обслуживания;
- квалификации персонала;
- вида применяемого на предприятии технического обслуживания и его особых моментов;
- общей эффективности предприятия;
- уровня производственной культуры и наличие системы менеджмента качества;
- существующей на предприятии системы закупки, транспортировки и складского хранения оборудования и др.

Этап 2. Определение составляющих найденной проблемы

По каждому из исследуемых моментов определяется та составляющая, которая и будет отвечать за повышение ресурсоэффективности. Путем документирования и паспортизации предприятия, выявляются «узкие» места в структуре предприятия.

Этап 3. Определение стратегии и разработка плана решения проблемы

Общий принципиальный путь решения проблемы повышения ресурсоэффективности оборудования определяет место и величину развития того или иного дефекта или уровень локализации опасных моментов. Она может быть либо частичная, в этом случае удаляются только наиболее проблемные аспекты, либо комплексная, когда решаются проблемы предприятия.

Первоочередной задачей определяется тот дефект, устранять который необходимо в первую очередь. План решения проблемы должен составляться предприятием на основе предложений аудиторов технической диагностики.

Этап 4. Выбор средств для принятия технических решений

На основе расчета экономического эффекта от внедрения принимается тот или иной набор средств и технических решений, определяется уровень квалификации обслуживающего персонала для реализации поставленной задачи.

Этап 5. Определение путей для комплексного решения проблемы

Опираясь на предыдущие этапы программы формулируется решение путях повышения ресурсоэффективности электрооборудования и в целом всего производства.

Этап 6. Контроль за результатами внедрения программы

По истечению некоторого времени необходима корректировка и улучшение программы, по мнению отдела менеджмента качества, если это необходимо.

Внедрение данной концепции должно опираться на требования технического надзора в области экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов в горнорудной и угольной промышленности и диагностике горнотранспортного, горно-шахтного и обогатительного оборудования.

Опираясь на данную концепцию, зная условия работы электроприводов, мы предлагаем новую методику диагностирования АД, которая в динамических режимах (а это, прежде всего пусковые режимы для такого рода оборудования) по обобщенному вектору тока определяет его состояние.

2.2. Разработка методики диагностирования асинхронных двигателей на основе концепции проактивного обслуживания

В данной работе конечно-элементная модель асинхронного двигателя, разработанная, нами ранее [128], используется для анализа неисправного двигателя. Предложенный подход используется для изучения влияния обрывов стержней ротора на пуск асинхронного двигателя. Данные моделирования анализируются с помощью Extended Park's Vector Approach и непрерывных вейвлет-преобразований.

Мы предлагаем использовать TSFE метод для исследования влияния обрывов стержней ротора на статорные токи асинхронного двигателя в пусковом режиме. TSFE модель АД разработана на языке программирования

Matlab и позволяет учитывать геометрию поперечного сечения двигателя, включая число и форму пазов ротора и статора, временные и пространственные гармоники магнитного поля внутри машины, нелинейность магнитной характеристики стали, сопротивление стержней и короткозамкнутых колец ротора, вытеснение тока в пазах ротора.

Модель основана на уравнениях Максвелла, исходя из допущения, что магнитное поле не изменяется вдоль оси z, параллельной оси вращения двигателя. Затем задача расчета магнитного поля решается с помощью метода конечных элементов в двумерной постановке. Электрические цепи (статорные и роторные обмотки) соединяются с магнитным полем посредством предложенной авторами методики [129]. Данная методика позволяет рассчитывать ток, протекающий в каждом элементе сетки паза ротора и, таким образом, учитывать неравномерное распределение тока по сечению паза ротора, вызванное влиянием скин-эффекта (эффекта вытеснения тока) во время пуска. Электромагнитный момент рассчитывается интегрированием тензора напряжений Максвелла.

Для математического моделирования использовался стандартный асинхронный двигатель серии 4А (380В, 1,5кВт, 2р=4), питаемый синусоидальным напряжением и пускаемый при пониженной нагрузке. Этот же двигатель мы использовали в качестве физической модели.

Рассмотрим две математические модели:

Состояние1: это конечно-элементная модель асинхронного двигателя в исправном состоянии.

Состояние2: – конечно-элементная модель двигателя с обрывом двух стержней ротора.

При моделировании у вышедших из строя стержней ротора проводимость принимается равной нулю. Сетка конечных элементов имеет 19942 элемента и 9992 узлов, временной шаг равен 0,1мс. На каждом шаге моделирования магнитная проницаемость стали каждого элемента сетки неисправного двигателя сохраняется в отдельный файл.

На рисунке 2.1. приведен пусковой ток фазы А для обоих случаев. Из рисунков хорошо видно, что отличия в графиках пусковых токов между исправным и неисправным двигателями едва заметны и не могут быть использованы для обнаружения обрывов стержней.

Однако, как видно из, полученного в результате расчетов (рисунок 2.2 и рисунок 2.3.), мгновенного распределения индукции магнитного поля вблизи поврежденных стержней подвержено существенным изменениям. Обрыв стержня приводит к перераспределению его тока в соседние стержни, что ведет к локальным искажениям магнитного поля. В стержне обрыв приводит к перераспределению токов текущих соседних стержней в результате локального возмущения распределения магнитного потока. Проведем исследование: как влияет асимметричное магнитное поле, создаваемое ротором при наличии оборванных стержней на пусковые токи, используя предложенный для этого принцип суперпозиции.

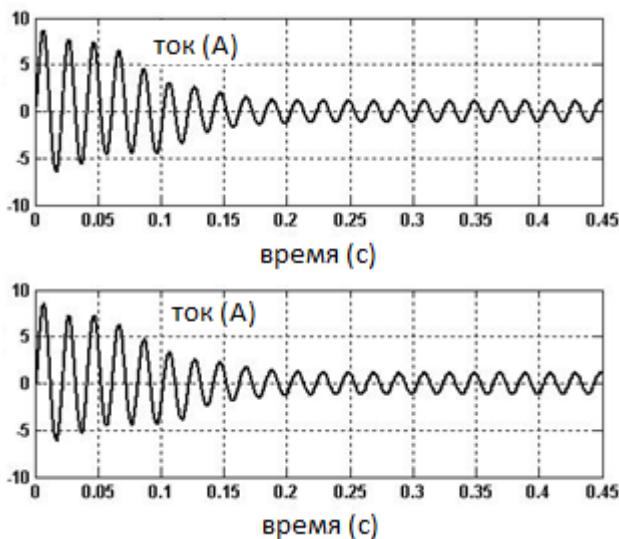


Рисунок 2.1. - Моделирование пускового фазного тока исправного двигателя (а) и неисправного с 2-мя неисправными стержнями (б) при отсутствии нагрузки

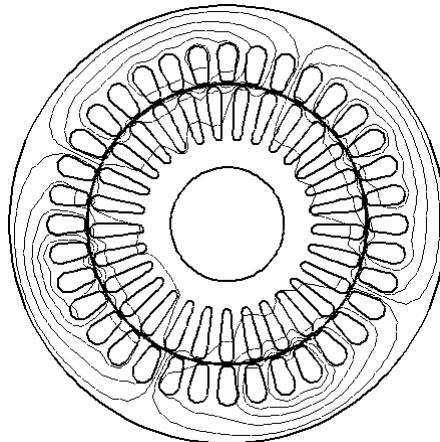


Рисунок 2.2. - Мгновенное распределение магнитного потока исправного двигателя в момент времени $t=0.024$ с

Сначала рассмотрим работу асинхронного двигателя в статическом режиме и исправном состоянии. Трехфазные токи в статорных обмотках создают вращающееся магнитное поле прямой последовательности с угловой скоростью ω . Ротор вращается с угловой скоростью $(1-s)\omega$, а магнитное поле статора, таким образом, относительно ротора вращается со скоростью $s\omega$. Магнитное поле статора наводит переменные токи в стержнях ротора, которые создают магнитное поле ротора, вращающееся со скоростью $s\omega$ в направлении вращения ротора. Таким образом, магнитное поле ротора вращается со скоростью ω относительно статора и не приводит к появлению в статорных обмотках новых составляющих.

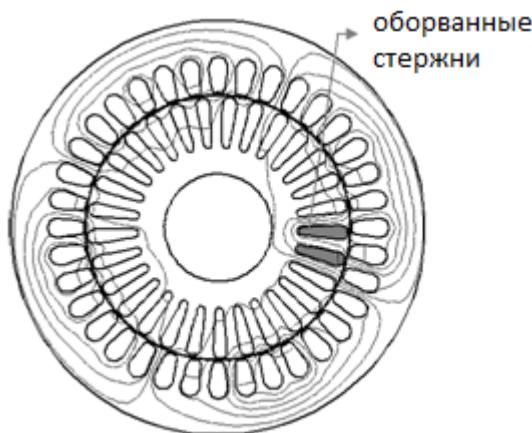


Рисунок 2.3. - Мгновенное распределение магнитного потока двигателя с 2-мя неисправными стержнями ротора в момент $t=0.024$ с

Ранее было отмечено, что поведение асинхронного двигателя при обрыве стержня ротора можно описать принципом суперпозиции Deleroi [17]. Ток источника тока, включенного в оборванный стержень, создает дополнительное магнитное поле ротора, вращающееся со скоростью $s\omega$ в обратном направлении относительно вращения ротора. Данное поле ротора обратной последовательности вращается со скоростью

$$\omega_{rbw} = (1-2s)\omega, \quad (2.1)$$

относительно статора и наводит в статорных обмотках токи с частотой $(1-2s)f_1$, которые представляют собой левую боковую гармонику в (2.1). Колебания скорости и момента, возникающие на частоте $2sf$, приводят к возникновению правой боковой гармоники.

Основная идея модификации, предлагаемая нами, необходимых для применения принципа суперпозиции для процесса пуска может быть изложена посредством двух дополнительных конечно-элементных расчетов состояния двигателя *Состояние11* и *Состояние22*. Эти расчеты соответствуют двум состояниям, сумма которых дает неисправный двигатель. Исходные условия для *Состояние11* и *Состояние22* можно представить таким образом:

Состояние11

В данном эксперименте использовался асинхронный двигатель, идентичный двигателю, задействованному в исследовании предыдущего раздела, без обрывов стержней, питаемый идеальным трехфазным синусоидальным напряжением. Положение ротора двигателя в каждый момент времени моделирования принимается положению ротора, рассчитанному в *Состояние3* для того же момента времени, но для неисправного двигателя. Чтобы учесть области локального насыщения железа вокруг стержней, сломанных в неисправном двигателе, используются вышеупомянутые файлы данных, сохраненные в *Состояние3*. Магнитная проницаемость каждого конечного элемента железа принимается равной значению, рассчитанному при моделировании неисправного двигателя и загруженному из соответствующего файла для той же рабочей точки. Это значит, что *Состояние11* представляет собой

исправный двигатель, в котором магнитная проницаемость стали и скорость вращения ротора имеют такие же значения, как и в случае неисправного двигателя *Состояние3*. На каждом шаге процесса моделирования плотность тока каждого конечного элемента, относящегося к сломанному стержню, записывается в файл данных для дальнейшего использования в *Состояние22*.

Состояние22

Двигатель рассматривается с закороченными статорными обмотками и источниками тока,ключенными в каждый сломанный стержень. Как ранее было сказано, распределение тока вдоль сечения стержня ротора неравномерно и модель рассчитывает ток, протекающий через каждый конечный элемент рассматриваемого паза вместо общего тока стержня. Следовательно, источник тока каждого сломанного стержня должен быть заменен несколькими источниками,ключенными параллельно, каждый из которых создает в своем конечном элементе ток со значением, рассчитанным в *Состояние11* и загруженным из соответствующего файла данных, но противоположного направления. Суммарный ток, получаемый при сложении *Состояние11* и *Состояние22* для каждого сломанного стержня, таким образом, равен нулю. Магнитная проницаемость стали и скорость вращения ротора имеют такие же значения, как и в случае неисправного двигателя *Состояние3* в предыдущем эксперименте. Магнитное поле ротора, создаваемое источниками тока, индуцирует в статорных обмотках токи, которые, согласно принципу суперпозиции, могут рассматриваться как вызванные неисправностью ротора дополнительные составляющие пусковых статорных токов. Проницаемость железа и скорости вращения ротора на каждом шаге моделирования времени также остается равными значениям из модели неисправного двигателя *Состояние3*, как и в предыдущем моделировании. Магнитное поле ротора, создаваемое неисправными источниками тока, индуцирует ток в обмотках статора которые, в соответствии с принципом суперпозиции, можно рассматривать как дополнительные компоненты позволяющие идентифицировать неисправность.

Для того, чтобы проверить выполняется ли принцип суперпозиции для пускового процесса, токи фазы А, рассчитанные в двух экспериментах *Состояние11* и *Состояние22* суммируются и сравниваются с током фазы А, рассчитанным для неисправного двигателя. Ошибка определяется как

$$\varepsilon(t) = 100\% \|(Ia_{Sup1}(t) + Ia_{Sup2}(t)) / Ia_{Faulty}(t)\|. \quad (2.2)$$

Ошибка, рассчитанная таким образом для каждого момента времени, составляет меньше 0,2%, а ее среднее значение меньше чем 0,05%, и определяется только остаточной ошибкой алгоритма нелинейного моделирования.

Результаты моделирования в виде графиков дополнительных составляющих тока, оцененных с помощью *Состояние22*, представлены на

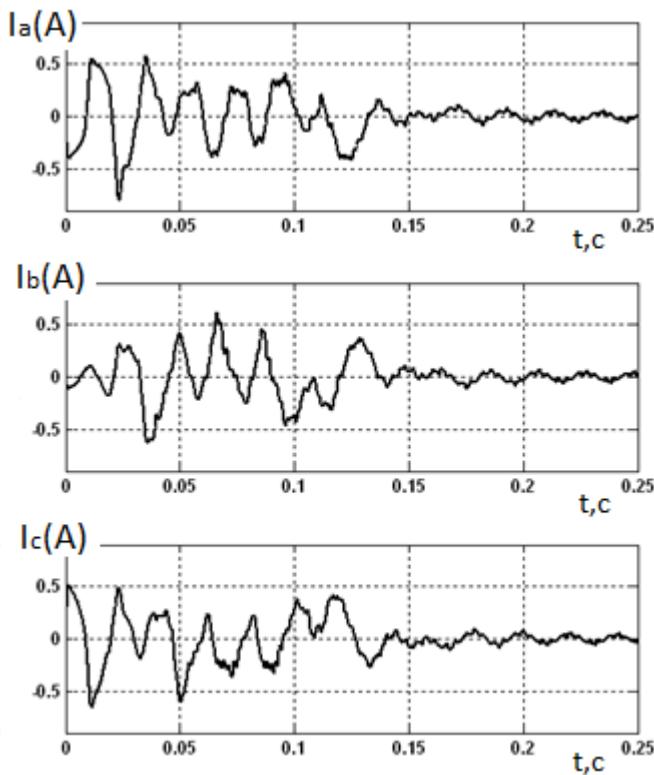


Рисунок 2.4. - Дополнительные составляющие тока, представленные при конечно-элементном моделировании с использованием принципа суперпозиции

Такой аспект используется для понимания физических явлений, связанных с неисправностями ротора в асинхронных двигателях, в различных режимах работы и при различных степенях развития дефекта.

Предлагаемый подход является новым и может способствовать интерпретации физических явлений, происходящих в роторе асинхронных двигателей, эксплуатируемых в различных условиях и на разных этапах развития дефектов.

2.3. Обоснование и выбор математического обеспечения для проактивного диагностирования асинхронных двигателей

На рисунке 2.5. показан ток в статорной обмотке фазы А, рассчитанный в *Состояние22*, в сравнении с пусковым током неисправного двигателя. Как можно заметить, амплитуда дополнительных составляющих тока намного меньше, чем амплитуда на частоте сети, что создает определенные трудности при выявлении неисправности. Проблема маскирования дополнительных составляющих основной сетевой гармоникой широко освещена в литературе. Для решения данной проблемы в [188] предлагается использовать адаптивный режекторный фильтр, а в [172] узкополосный фильтр, для подавления сетевой частоты в сигнале статорного тока. В [214] дискретные вейвлет-преобразования используются для выделения левой боковой гармоники из пускового тока. Еще одна методика [217] основана на выделении огибающей статорного тока. Интересен метод, основанный на reference frame теории (теории отсчетов), предложен в [169]. Однако этот метод требует точного измерения скорости и его применение без датчиков скорости на электроприводе невозможно. Фильтрование сетевой частоты также не может быть использовано, так как это может оказаться влияние и на другие составляющие, в том числе, связанные с повреждениями ротора, что может привести к заведомо ложным результатам. Мы предлагаем другой подход, который не оказывает влияние на дополнительные составляющие статорного тока и не требует измерения скорости. Этот подход основан на анализе модуля вектора Парка тока (обобщенного вектора тока) и известен как Park vector approach.

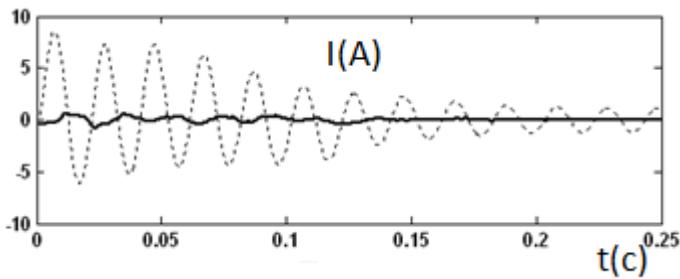


Рисунок 2.5. - Пусковой ток двигателя с 2-мя сломанными стержнями (пунктир) и расчетные дополнительные компоненты тока (сплошные)

Преобразования Парка используются для приведения трехфазной системы (A-B-C) к эквивалентной двухфазной (D-Q). Выражения для преобразования имеют следующий вид [112]:

$$\begin{aligned} I_d &= i_a - \frac{1}{2} i_b - \frac{1}{2} i_c; \\ I_q &= \frac{\sqrt{3}}{2} i_b - \frac{\sqrt{3}}{2} i_c. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Выражение для модуля вектора Парка (МВП) тока:

$$I_S = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}. \quad (2.4)$$

Таким образом, уравнения для МВП тока преобразуют трехфазные токи статора в эквивалентную постоянную составляющую, которая может быть легко отфильтрована из исходного сигнала и, следовательно, облегчают выявление присутствия дополнительных составляющих в исходном сигнале.

На рисунке 2.6 приведены графики модуля вектора Парка тока, полученные в результате КЭ моделирования пускового процесса для случаев исправного и неисправного двигателей. Как можно заметить, форма графика неисправного двигателя несколько искажена под влиянием дополнительных составляющих тока, вызванных обрывом двух стержней. Это показывает, что после того, как пусковой ток был подвергнут преобразованиям Парка, сетевая

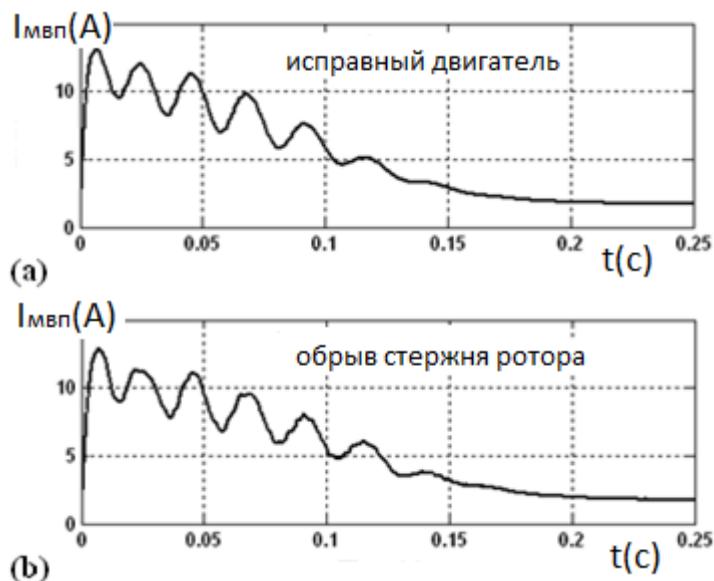


Рисунок 2.6. - Графики МВП тока, полученные в результате КЭ моделирования пускового процесса для случаев исправного (а) и неисправного двигателя с двумя сломанными стержнями ротора (б) составляющая 50 Гц была успешно удалена, что позволило выявить изменения в токе, вызванные несимметрией магнитного поля, показанной на рисунке 2.6.

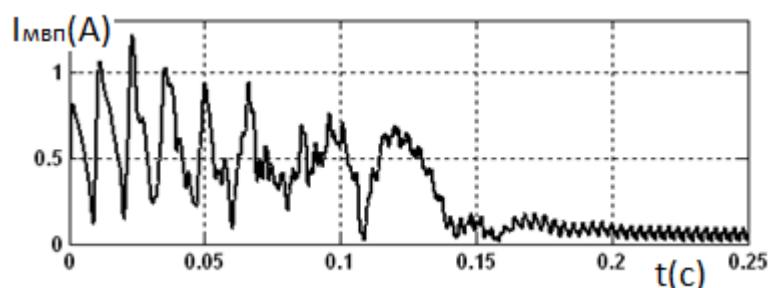


Рисунок 2.7. - Преобразования токов рисунка 2.6 б по МВП

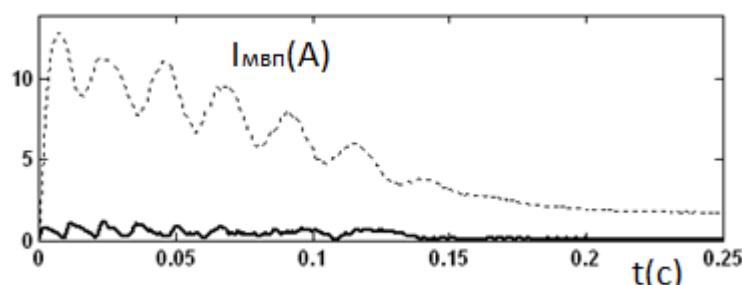


Рисунок 2.8. - Обобщенный вектор пускового тока двигателя с 2-мя неисправными стержнями (пунктир) и дополнительные компоненты тока (сплошные)

Составляющие тока, показанные на рисунке 2.6 б, были преобразованы с помощью выражений (2.3.) и (2.4) и полученная кривая изображена на рисунке 2.7.

На рисунке 2.8 показаны пусковой ток неисправного двигателя в сравнении с оцененными моделью дополнительными составляющими тока, вызванными неисправностью после преобразований их согласно *Park's vector approach*.

При сравнении графиков рисунок 2.5 и рисунок 2.6 и принимая во внимание, что постоянная составляющая модуля Парка питающего тока может быть легко удалена, преимущество данного подхода становится вполне очевидными, он требует для своей реализации измерения двух статорных токов.

Рассмотрим влияние 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 (2.1), проявляются в модуле вектора Парка тока на частоте:

$$f_{PIrotorbar} = 2sf_1. \quad (2.5)$$

Согласно (2.5) 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. Соответствующий график изменения частоты показан на рисунке 2.9.

Пусковой процесс – это процесс нестационарной природы. Один из наиболее мощных методов для анализа нестационарных или изменяющихся во времени сигналов это вейвлет-преобразования [175, 193, 195], имеющие ряд преимуществ по сравнению с другими методами обработки сигналов, такими, как преобразования Фурье и оконные преобразования Фурье. В последние годы некоторые авторы начали применять этот инструмент для диагностики неисправностей стержней ротора. Применение вейвлет-преобразования используются при анализе токов в [171, 180, 187-188] при

пуске, при изменении скорости и момента нагрузки [168, 201] и во время останова [187]. Вейвлет-преобразования можно рассматривать как пропускание исходного сигнала через несколько полосовых фильтров, каждый из которых выделяет компоненты сигнала в определенном диапазоне частот и, таким образом, представляя сигнал сразу в частотной и во временной областях.

Как ранее отмечалось, обрывы стержней приводят к появлению магнитного поля ротора обратной последовательности. Согласно (2.3) 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

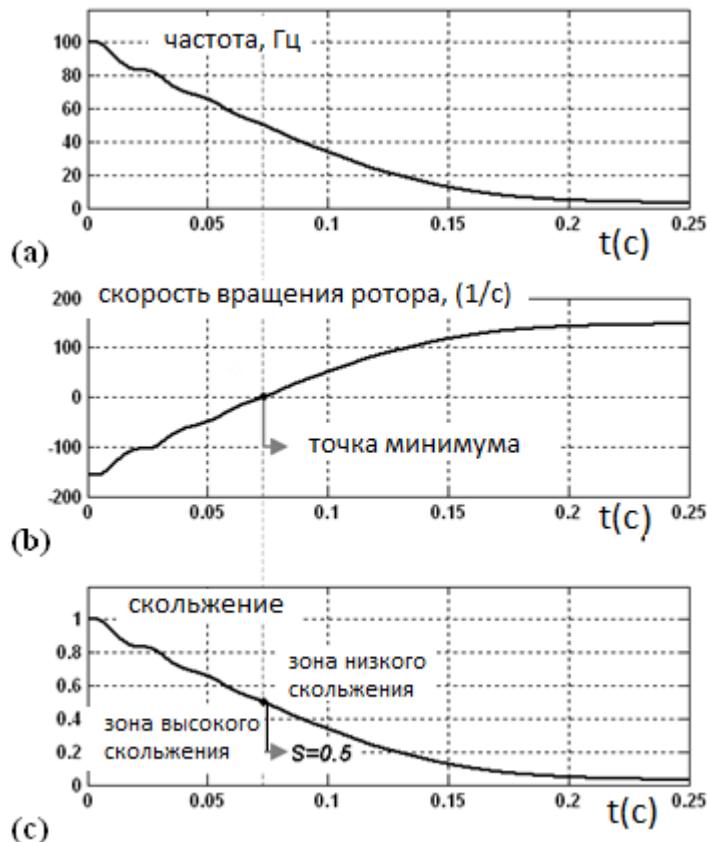


Рисунок 2.9. - Расчетное значение частоты тока ротора (а),
скорость вращения ротора (б), скольжение машины (с)

анализа было выявлено, что при изменении направления вращения поля меняется и сам характер поведения наведенных им дополнительных составляющих. В связи с этим предлагается условно поделить пусковой процесс во

временной области на две зоны (рисунок 2.9 (б) и (с)). 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 установленного значения.

На рисунке 2.10 показаны спектрограммы дополнительных составляющих, полученных с помощью процедуры непрерывных вейвлет-преобразований (CWT). Данные графики демонстрируют различия в характере поведения данных составляющих в частной области для различных диапазонов скольжения. Можно заметить, что данные паттерны соответствуют графику изменения частоты составляющей $2sfI$ в сигнале МВП пускового тока, приведенному на рисунке 2.9 (а), что 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

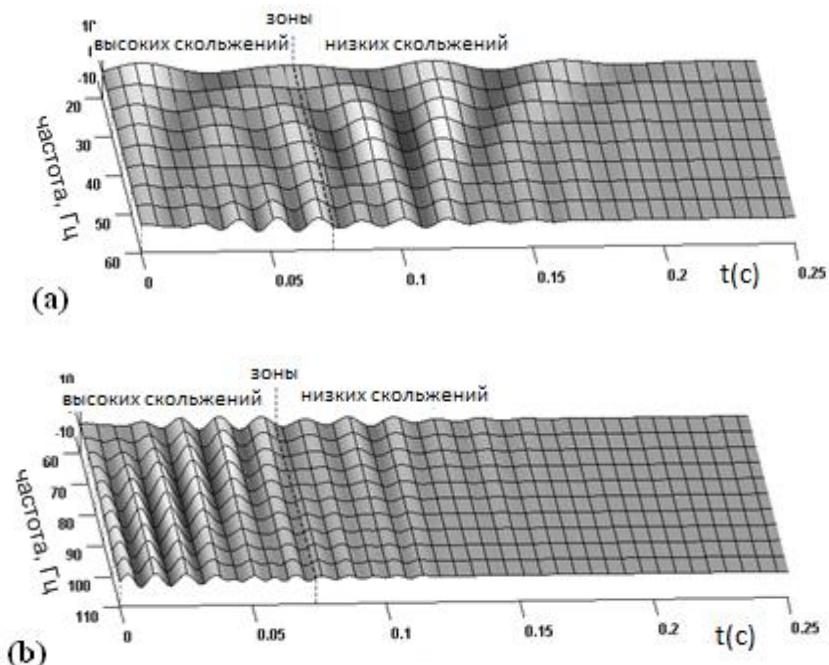


Рисунок 2.10. - Спектрограммы моделируемых неисправностей дополнительных компонент для диапазона частот от 20 до 60 Гц (а) и от 60 Гц до 110 Гц (б)

неисправностью, меняет свое направление, т.е. когда скольжение становится равным 0,5. Паттерны изменения амплитуды и частоты, представленные на рисунке 2.9 также согласуются с представленными результатами в [179, 180, 187, 206 и 215].

Чем больше значения вейвлет-коэффициентов в определенной времененной и частотной области, тем больше энергии вызванных неисправностью составляющих сосредоточено в данной области и, в конечном итоге, тем более явно составляющие будут проявлять себя в токе статора. На рисунках 2.11 и 2.12 приведены вейвлетные спектрограммы сигналов МВП тока представленных на рисунке 2.6.

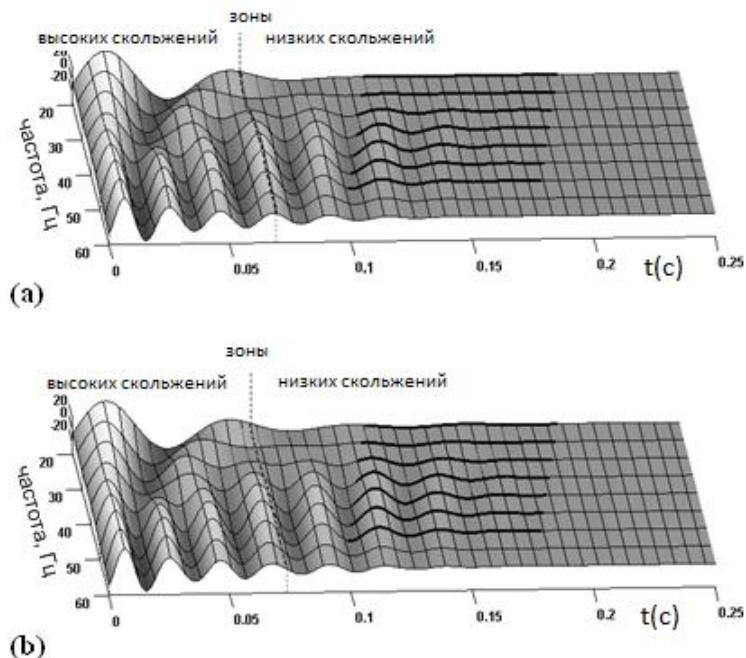


Рисунок 2.11. - Спектрограммы моделируемого модуля вектора Парка исправного двигателя (а) и неисправного (б) при пуске (диапазон частот: 20-60Гц)

На рисунках 2.10, б и 2.11, б видно как паттерны, характерные вызванным неисправностью составляющим, влияют на форму спектрограммы сигнала МВП тока двигателя с обрывом двух стержней.

Сравнивая два рисунка, можно заметить, что хотя в зоне низких скольжений различия несущественны, в зоне высоких скольжений они вполне очевидны.

видны. Появление в двигателе двух дефектных стержней, а, следовательно, и появление дополнительных составляющих в токе статора, увеличивает колебания вейвлет-коэффициентов в выделенной области зоны высоких скольжений, что может быть использовано для выявления неисправности. Как показано на рисунке 2.13 колебания вейвлет коэффициентов в зоне низких скольжений не превышают 5% от величин этих коэффициентов для исправного двигателя, при этом в зоне высоких скольжений отличия составляют 25%.

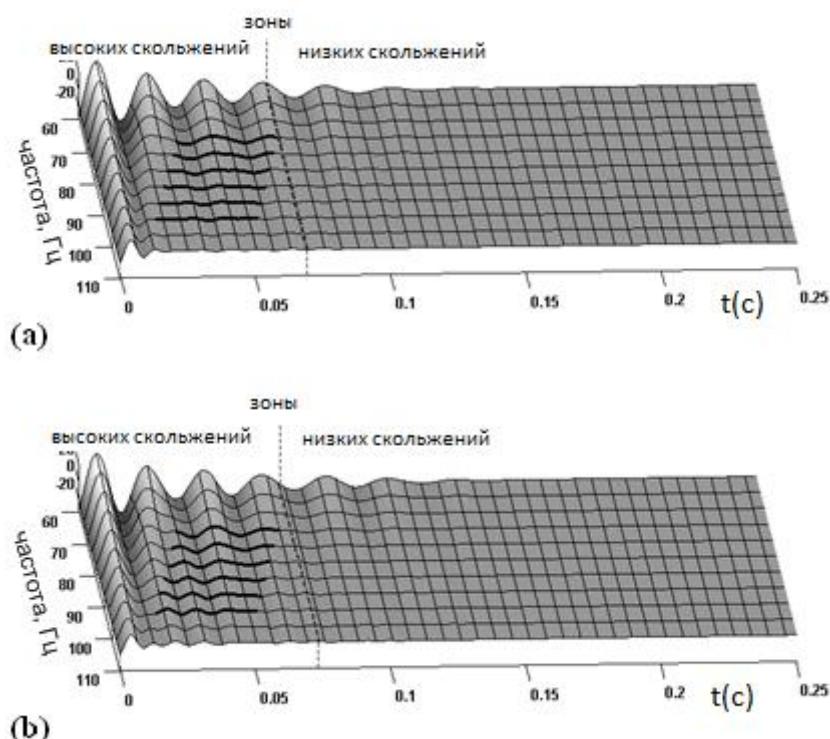


Рисунок 2.12. - Спектрограммы моделируемого модуля вектора Парка исправного двигателя (а) и неисправного (б) при пуске (диапазон частот: 60-110 Гц)

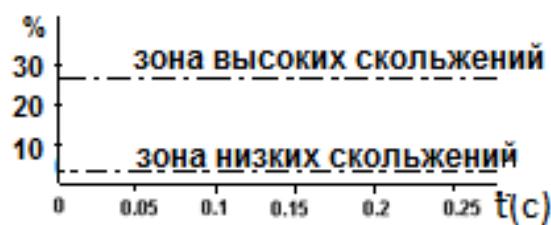


Рисунок 2.13. - Различия в вейвлет-коэффициентах исправного двигателя и с обрывом двух стержней ротора

Следует сделать замечание: выбор CWT в данном исследовании связан только с удобством изучения рассматриваемых явлений, так как CWT дает более гибкий инструмент для анализа по сравнению с DWT. С другой стороны CWT требует большей вычислительной мощности, чем DWT из-за высокой избыточности информации, получаемой в ходе CWT.

2.4. Экспериментальная проверка метода спектрально токовой диагностики асинхронных двигателей

Для того чтобы проверить результаты моделирования проведены несколько экспериментов. Двигатель, используемый в экспериментах, имеет те же характеристики что и двигатель, рассчитанный на модели (4 полюса, 29 стержней ротора, 380 В, 1,5 кВт, 50 Гц), испытания проведены в тех же условиях.

Два тока двигателя, получены с помощью системы сбора данных с частотой дискретизации от 8 кГц. Двигатель пускается при отсутствии нагрузки без неисправности и с неисправным ротором, который имеет два и четыре сломанных стержня. Неисправности получены, просверлив отверстие в стержнях.

На рисунке 2.14 представлены экспериментально измеренные сигналы тока модуля вектора Парка во время переходного процесса (пуска) исправленного двигателя и двигателя с двумя и четырьмя просверленными стержнями. Полученные данные были обработаны с помощью непрерывного вейвлет преобразования из *Matlab Wavelet Toolbox*. Полученные спектрограммы вейвлет приведены на рисунках 2.15 и 2.16. Как следует из рисунков, эти спектрограммы показывают схожесть с теми, которые показаны на рисунках 2.11 и 2.12. Исправные двигатели (рисунок 2.15 (а) и 2.16 (а)) показывает некоторые начальные пульсации вейвлет-коэффициентов в отдельных частях высокой и низкой зонах скольжения из-за наличия некоторой асимметрии ротора. Как было показано при моделировании, поломка двух стержней (рисунок 2.15 (б) и 2.16 (б)) увеличивается пульсация вейвлет-коэффициентов в

зоне высокого скольжения и незначительно влияет в спектрограмме сигнала в зоне низким

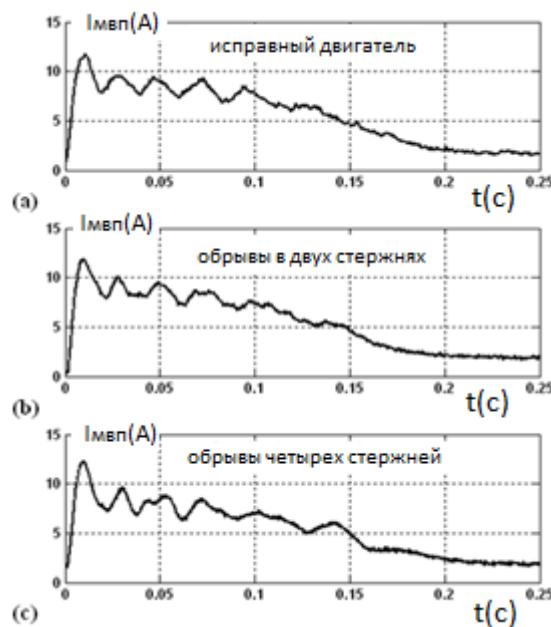


Рисунок 2.14. - Экспериментально измеренные значения тока модуля вектора Парка (а) исправного двигателя, (б) двигателя с 2-мя сломанными стержнями ротора и (с) двигателя с 4-мя сломанными стержнями ротора во время пуска

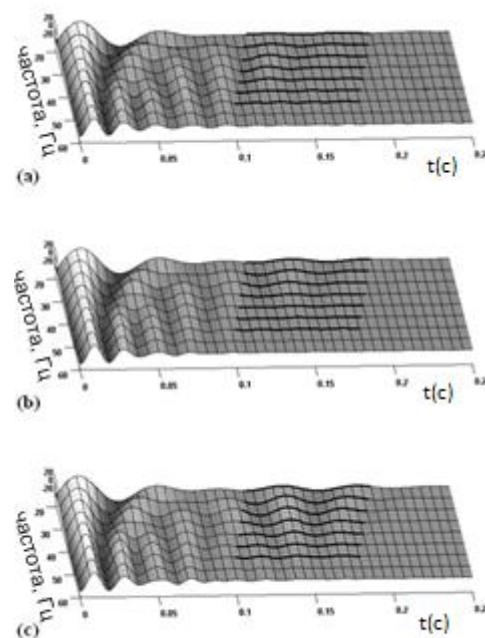


Рисунок 2.15. - Спектрограммы экспериментально измеренного значения тока модуля вектора Парка (а) исправного двигателя, (б) двигателя с 2-мя сломанными стержнями ротора и (с) двигателя с 4-мя сломанными стержнями ротора во время пуска (диапазон частот: 20-60Гц)

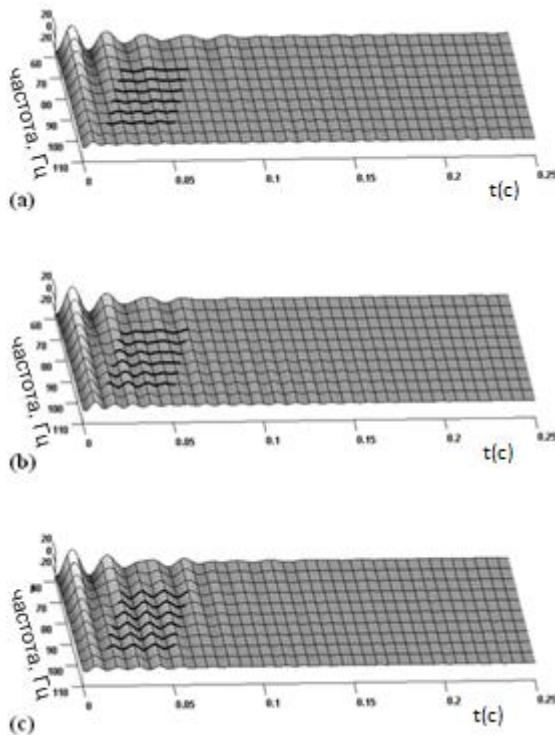


Рисунок 2.16. - Спектрограммы экспериментально измеренного значения тока модуля вектора Парка (а) исправного двигателя, (б) двигателя с 2-мя сломанными стержнями ротора и (с) двигателя с 4-мя сломанными стержнями ротора во время пуска (диапазон частот: 60-110Гц)

скольжением. Кроме того, увеличение просверленных стержней до четырех (рисунок 2.15 (с) и 2.16 (с)) приводит к увеличению пульсации вейвлет-коэффициентов не только в высокой зоне скольжения, но и в зоне низкого скольжения (рисунок 2.17).

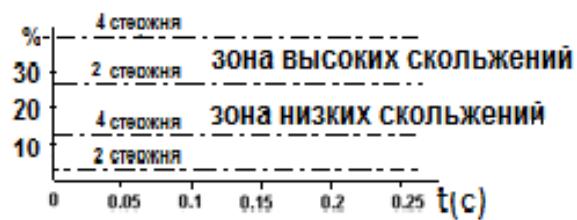


Рисунок 2.17. - Различия в вейвлет-коэффициентах исправного двигателя и с обрывом стержней ротора

Таким образом, мы предлагаем новый подход в диагностике асинхронных двигателей в динамических режимах, основный на проведении оценки статорного тока во время пуска. Принцип суперпозиции, который применял-

ся 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. Проверка предлагаемого подхода показывает, что полученные данные хорошо согласуется с экспериментальными результатами, а также с вопросами ранее освещавшиеся в технической литературе.

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

2.5. Развитие метода проактивного диагностирования асинхронных двигателей

2.5.1. Диагностика короткого замыкания обмоток статора

Исследования процессов пуска различных асинхронных двигателей механизмов горно-обогатительного производства ОАО ММК позволил 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* [159]. Под непрерывным вейвлет-преобразованием (CWT), понимают приведение сигналов и функций к аналитическому виду. При преобразовании данных на ЭВМ они вводятся как дискретные, т.е. рядом результата измерения. При дискретизации выполненной корректно и, если максимальные частоты данных не превышают частоты Найквиста, то можно восстановить аналоговую форму сигнала. Примеча-

тельно, что при обработке данных в аналоговой форме с применением аналитических методов не дает преимуществ перед применением цифровых методов. Чаще всего применяют замену аналитического метода дискретным аналогом с использованием малого шага дискретизации. Применимельно к CWT, так как мы используем только анализ сигнала, без последующего его синтеза, то дискретизация сигнала выполняется с любой частотой, даже если она не удовлетворяет критерию Найквиста.

Континуальный вейвлет-анализ можно представить мощным инструментом временного и спектрального анализа, с помощью которого можно построить частотно-временные характеристики сигнала, раскрывающие природу не только самого сигнала, но и его составляющих. Характерные особенности присущие континуальному вейвлет-анализу следующие:

- Во-первых, сигнал в спектральной области представляется трехмерным. Такое представление избыточно и может напоминать изображение детали, как на эпюре Монжа: при этом эпюры не может вносить в деталь конструктивных изменений, но существенно увеличивает объем информации о ней. Подобное представление обеспечивает, обслуживающий персонал, необходимой информацией, как о временных, так и о спектральных характеристиках сигнала.

- Во-вторых, отличительной чертой является возможность уменьшения избыточной информации, алгоритмами сжатия и выделения сигнала из шума, введением методов статистического анализа. Процедуры синтеза вейвлет-спектра сигнала и его последующее сжатие, позволяют использовать гибкость вейвлет-анализа средствами применения специализированных функций.

Результирующее преобразование CWT(a, b) используется в процессе обработки сигналов где, прежде всего, происходит дилатации материнской функции, т.е. происходит в первую очередь растяжение, а затем ее сжатие в a раз. Рассмотрим поведение исходного сигнала (обобщенного вектора тока), амплитуда его по мере сжатия вейвлет-функции, как следует из алгоритма

преобразований, стремиться к постоянному значению и, напротив, содержит несколько полных периодов внутри носителя сильно растянутого вейвлета рисунок 2.18. Как видно из рисунка, результатом преобразования CWT(a, b) является функция двух переменных: b -корреляционного сдвига и a -масштабирующей переменной, так называемой, материнской вейвлет-функции. Максимумы и минимумы континуального преобразования, выделенные на рисунке, характеризуют местоположение всплесков сигнала, которые соответствуют выбору определенных значений масштабирующей переменной вейвлета. На это указывает и наличие контурных линий, которые сходятся к вершине экстремумов. В качестве двух пар (a, b), заданы значения (20,8) и (40,4), которые материализуются пунктирными линиями в правом нижнем графике контур участка CWT. Обнаружение экстремумов в этих точках характерно для обобщенных векторов пускового тока всех двигателей, не имеющих неисправностей. Поэтому, можно предположить, что, два локальных максимумов абсолютных значений непрерывных коэффициентов вейвлет подходят для идентификации исправности двигателя.

При исследовании двигателя насоса 45 кВт получен сигнал обобщенного вектора тока рисунок 2.19 на первый взгляд, типичный остальным. При исследовании его с помощью непрерывного вейвлет преобразования CWT наблюдается увеличение амплитуды растянутого вейвлета, также смещение экстремумов корреляционного сдвига b и масштабирующей переменной a материнской вейвлет-функции.

Впоследствии этот двигатель был выведен из эксплуатации. Причина - межвитковое замыкание статорных обмоток. В конечно-элементную модель была заложена такая неисправность. Расчеты показали качественное совпадение преобразованного обобщенного вектора тока рассчитанного на модели с полученным ранее значением на неисправном двигателе. Таким образом, непрерывное вейвлет-преобразование CWT обобщенного вектора тока при пуске позволяет выявить на ранних стадиях старение изоляции, приводящее к межвитковому замыканию.

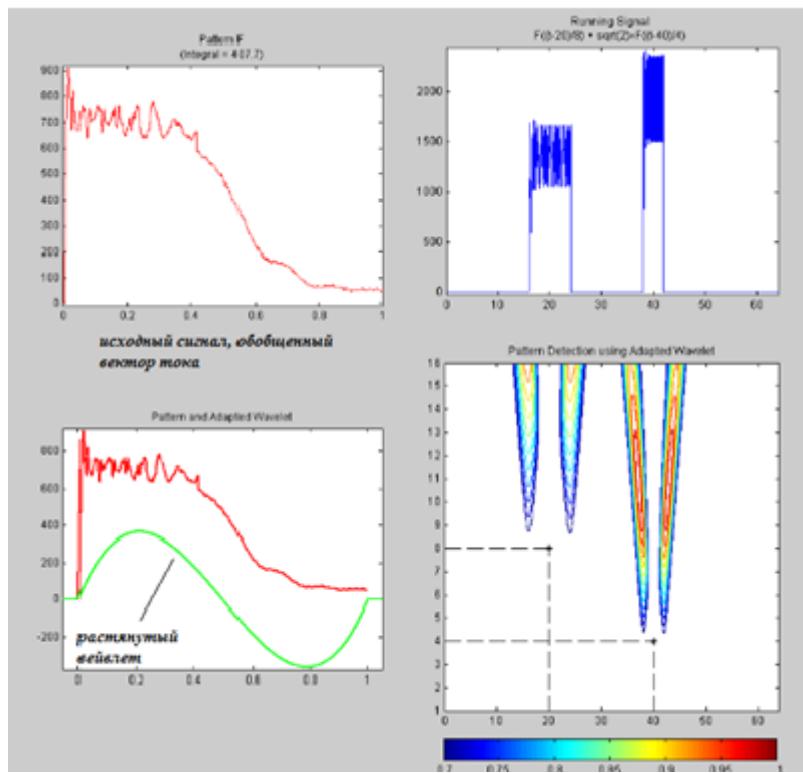


Рисунок 2.18. - Непрерывное вейвлет-преобразование обобщенного вектора тока исправного двигателя

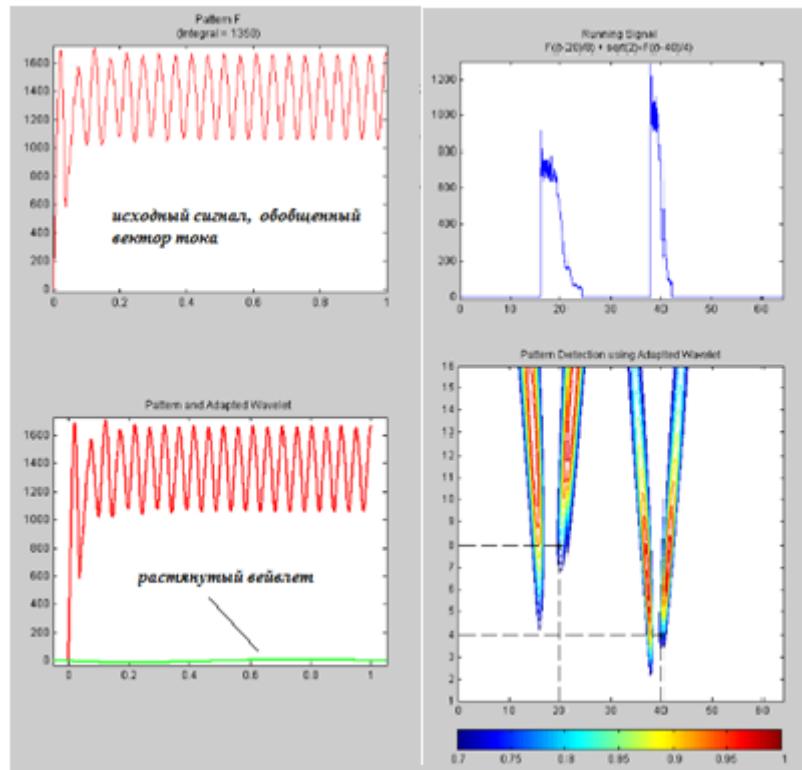


Рисунок 2.19. - Непрерывное вейвлет-преобразование обобщенного вектора тока неисправного двигателя (межвитковое замыкание)

2.5.2. Диагностика магнитной системы асинхронного двигателя

Послеремонтный срок службы двигателя после череды ремонтов заметно снижается. Это обусловлено накоплением неисправимых дефектов, вызванных не только старением изоляции в электрической части, но и повреждениями непосредственно в магнитной системе электродвигателя. Последние зачастую возникают в процессе деструкции (извлечения) обмоток из пазов.

В условиях существующих сервисных служб не всегда удается квалифицированно провести предремонтную разборку двигателя. Естественное «спекание» составных частей в процессе длительной эксплуатации не позволяет провести деструкцию поврежденных обмоток без повреждения конструктивных элементов электродвигателя, включая магнитопровод. Представители ремонтных предприятий отмечают, что любые виды обслуживания часто приводят к возникновению дополнительных дефектов. Даже испытания изоляции обмоток двигателя высоким напряжением способствуют его преждевременному старению и выходу из строя. По этой причине на первый план выдвигается широкий круг задач, связанных с разработкой и внедрением принципиально новых методов неразрушающего контроля состояния электродвигателей.

В настоящее время в службах ООО «Электроремонт» при ОАО «ММК» применяются различные методы деструкции обмоток: механическое извлечение, термические воздействия, термоокислительные процессы, а также процедуры химической и гидролитической деструкции. Каждый из них, по мнению специалистов, оказывает свое негативное влияние на двигатель в целом и на его сердечник в частности.

Каждый из известных методов деструкции обмоток приводит к возникновению дефектов различного типа. В частности, термоокислительная деструкция, осуществляемая путем обжига в печах при температуре 290-320°C, приводит к коррозии металла и необратимым тепловым деформациям. При

химической деструкции электротехническая сталь также сильно коррозирует под воздействием сильных минеральных кислот. При гидролитической деструкции изоляция разрушается в специальных автоклавах перегретыми водными растворами, а любая термическая обработка ухудшает магнитные свойства сердечника за счет увеличения «гистерезисных» потерь.

Наиболее распространенным является, безусловно, метод механической деструкции, при котором разрезаются лобовые части и специальным приспособлением вытягиваются обмотки из пазов. Это приводит к дефектам сердечника механического характера: ослаблению прессовки, «расpushению» крайних пакетов, повреждениям межлистовой изоляции. Ослабление прессовки, в свою очередь, приводит к появлению шума и повышенной вибрации, которая в динамических режимах увеличивает амплитуду в несколько раз из-за квадратичной зависимости электродинамических сил от величины тока. Кроме того, увеличивается коэрцитивная сила и потери на гистерезис, уменьшается магнитная проницаемость. «Расpushение» крайних пакетов вызывает излом листов. Но самым опасным дефектом, появляющимся при любой химической, термической или другой деструкции, является повреждение межлистовой изоляции, приводящее к повышению температуры магнитопровода за счет увеличения в токе холостого хода составляющей на «вихревые токи». В целом перегрев двигателя приводит к сокращению последующих межремонтных сроков службы двигателя.

На протяжении многих лет ремонтные службы ООО «Электроремонт» ОАО «ММК» проводят оценку состояния электродвигателей на соответствие паспортным данным. При этом отмечается ухудшение магнитного состояния АД после каждого ремонта на 4-5 %, независимо от метода применяемой деструкции. Таким образом, возникает необходимость определения состояния магнитной системы асинхронного двигателя, непосредственно после ремонта, так и в процессе послеремонтной эксплуатации, когда могут проявляться скрытые дефекты.

Общеизвестно, что магнитное состояние электрической машины характеризуется положением рабочей точки на участке колена кривой намагничивания ближе к участку насыщения. Поэтому в переходных и установившихся режимах следует учитывать изменение во времени индуктивностей, обусловленных нелинейностью кривой намагничивания. При этом следует также принять во внимание, что индуктивности рассеяния статора и ротора мало зависят от насыщения машины, так как их поля замыкаются по воздуху. Поэтому будем учитывать влияние насыщения только на взаимную индуктивность L_m .

Наиболее распространенным способом учета насыщения магнитной цепи АД является определение величины взаимной индуктивности из зависимости главного потокосцепления ψ_m от тока намагничивания i_m . При этом наиболее простым аналитическим представлением кривой намагничивания среди многообразия, имеющихся в литературе, является зависимость:

$$\psi_m(i_m) = \psi_1 \left(1 - e^{-\frac{i_m}{i_1}} \right) + k i_m, \quad (2.6)$$

где все необходимые параметры (ψ_1 , i_1 , k) аппроксимирующей функции достаточно просто определяются из кривой намагничивания.

Величина результирующего тока намагничивания АД в каждый момент времени определяется согласно выражению:

$$i_m = \sqrt{\frac{i_{ma}^2 + i_{mb}^2 + i_{mc}^2}{3}}, \quad (2.7)$$

где $i_{mj} = i_{sj} + i_{rjs}$.

Исходя из найденного значения намагничающего тока и аналитически заданной кривой намагничивания, величина взаимной индуктивности определяется согласно выражению:

$$L_m = \frac{\psi_m(i_m)}{i_m}. \quad (2.8)$$

Учет влияния насыщения, в большинстве случаев, приводит к усложнению модели двигателя, поэтому в конкретных задачах исследований нужна оценка необходимости учета состояния цепи намагничивания АД.

Классический подход к моделированию асинхронных двигателей характеризуется широким спектром применяемых методик, ориентированных на решение задач различной сложности и отличающихся степенью идеализации электрической машины [68]. Большинство из них базируется на допущении о полной симметрии рассматриваемой электрической машины. Однако наличие в двигателе неисправностей того или иного рода подразумевает нарушение данной симметрии.

Рассматривая картину относительной магнитной проницаемости в попечном сечении с силовыми линиями магнитного поля (рисунок 2.20), можно отмечать местоположение неисправностей в магнитной системе асинхронного двигателя.

Тот или иной дефект можно идентифицировать при рассмотрении потока магнитной индукции в воздушном зазоре и анализе его спектра (рисунок 2.21).

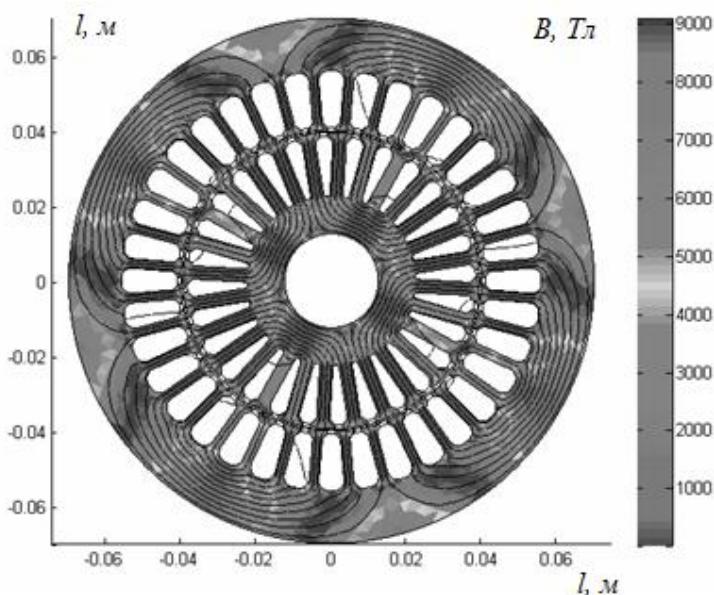


Рисунок 2.20. - Распределение потока магнитной индукции вдоль попечного сечения двигателя в каждый момент времени

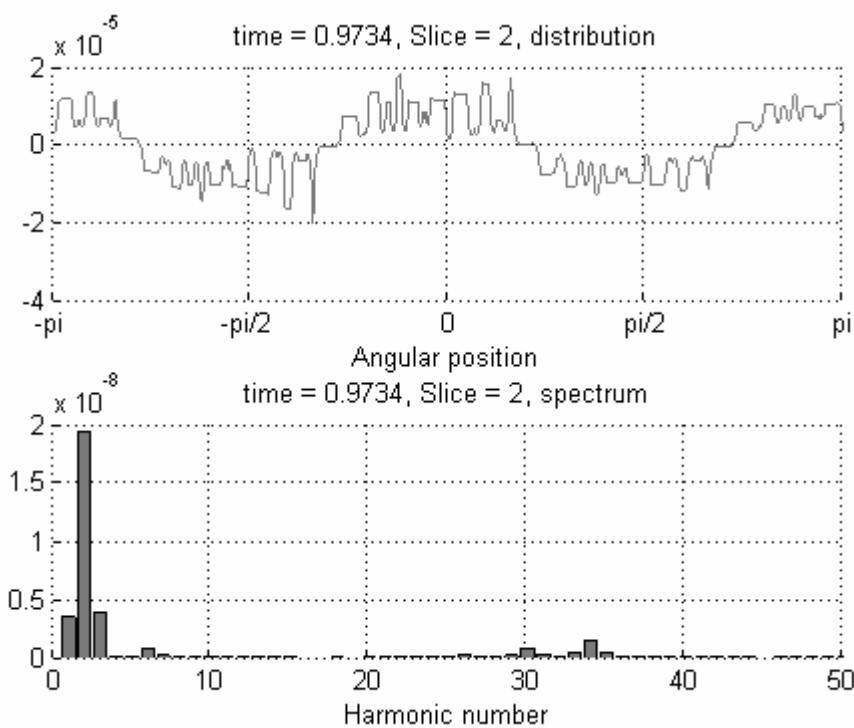


Рисунок 2.21. - Форма кривой распределения магнитного потока в воздушном зазоре двигателя и его высших гармоник в каждый момент времени

Для двигателя АЗ мощностью 500кВт, напряжением 3000В проходившем средний ремонт в 2001году аглоцеха ГОП ОАО «ММК» перед следующим средним ремонтом в августе 2013 г. были записаны значения пусковых токов и по ним построена кривая обобщенного вектора тока, затем, она была обработана в пакете MatLab непрерывным вейвлет-преобразованием (рисунок 2.22а). При последующем вводе в эксплуатацию этого двигателя получена аналогичная кривая рисунок 2.22б, 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 нарушенена магнитная система, либо, что воздушный зазор изменился. Воздушный зазор не изменился, следовательно, произошло изменение в магнитной системе двигателя.

Предлагаемая методика исследований на основе конечно-элементной модели асинхронного двигателя, позволяет реализовать в своем составе различные неисправности, как электромагнитной так и в магнитной системе.

Дает возможность создать в конечном итоге библиотеку дефектов и алгоритмы их идентификации.

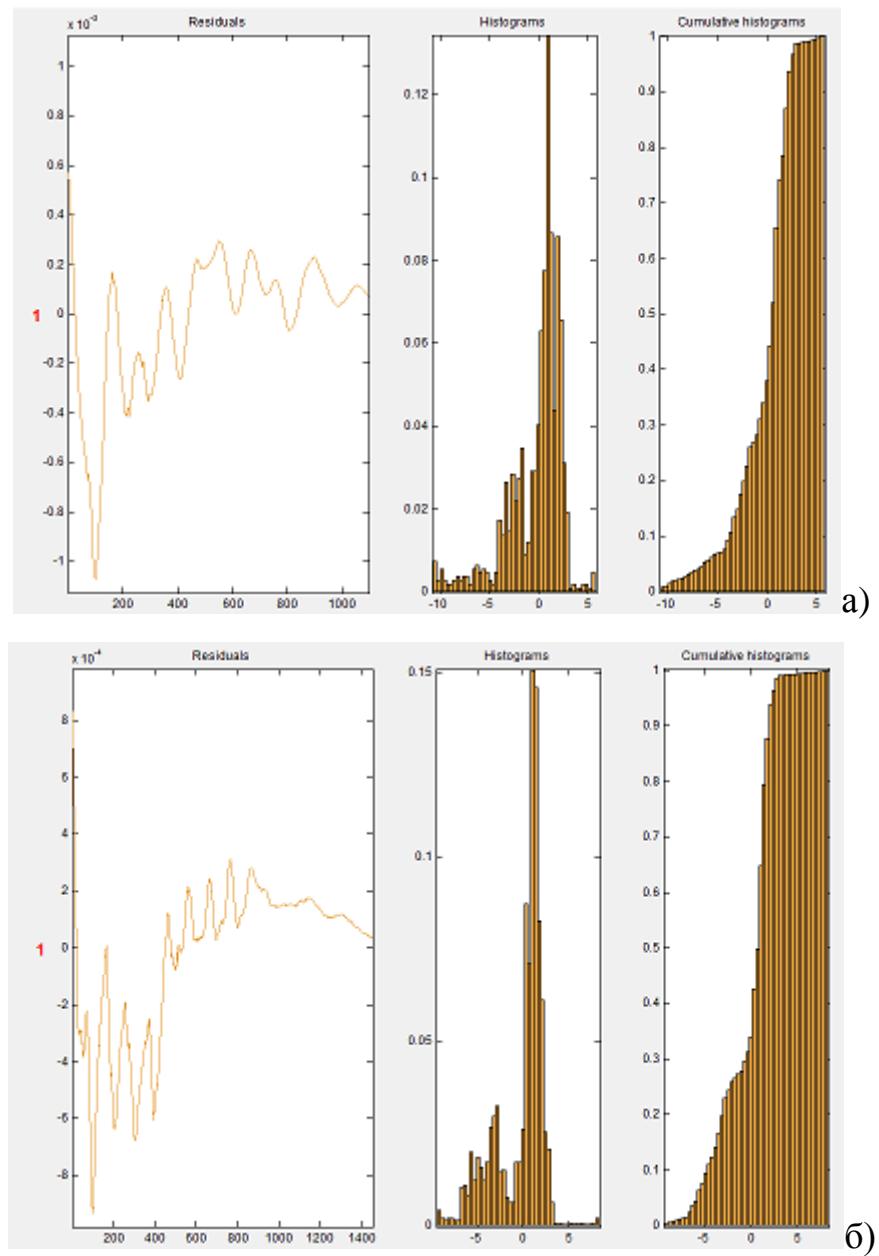


Рисунок 2.22. - Кривая обобщенного вектора тока, его гистограмма и кумулятивная гистограмма до ремонта а) и после ремонта б) асинхронного двигателя

Выводы по главе 2

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

2. Метод, сочетающий вейвлет-преобразования с векторным анализом тока модуля вектора Парка, был использован для анализа модельных и экспериментальных данных. Показано, что векторный анализ тока модуля вектора Парка позволяет повысить чувствительность вейвлет-преобразования для обнаружения неисправностей ротора по сравнению с другими методами.

3. Форма графика обобщенного вектора тока неисправного двигателя искажена под влиянием дополнительных составляющих тока, вызванных обрывом двух стержней. После того как пусковой ток был подвергнут преобразованиям парка, сетевая составляющая 50 Гц была удалена, что позволило выявить изменения в токе, вызванные несимметрией магнитного поля.

4. Обрывы стержней приводят к появлению магнитного поля ротора обратной последовательности. В ходе анализа было выявлено, что при изменении направления вращения поля меняется и сам 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 установленного значения.

5. В зоне низких скольжений различия несущественны, в зоне высоких скольжений они вполне очевидны. Появление в двигателе двух дефектных стержней, а, следовательно, и появление дополнительных составляющих в токе статора, увеличивает колебания вейвлет-коэффициентов в выделенной

области зоны высоких скольжений, что может быть использовано для выявления неисправности.

6. Непрерывное вейвлет преобразование CWT обобщенного вектора тока при пуске позволяет выявить на ранних стадиях старение изоляции, приводящее к межвитковому замыканию. Диагностическим признаком является увеличение амплитуды растянутого вейвлета и смещение экстремумов корреляционного сдвига b и масштабирующей переменной a материнской вейвлет-функции.

ГЛАВА 3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕПЛОВЫХ МОДЕЛЕЙ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ

3.1. Разработка трехмассовой тепловой модели асинхронного двигателя

При работе асинхронного двигателя имеются необратимые потери в виде электрической и механической энергии, которые проявляются выделением теплоты, которая в активных частях машины нарушает ее тепловую однородность. Это приводит всегда к переносу теплоты от активных частей к конструктивным элементам и окружающую среду, поэтому асинхронная машина должна представляться, по возможности, как электромеханическая, так и тепловая система. Для увеличения показателей работоспособности электрической машины электродвигателя должно ограничиваться определенным пределом нагрева любой из его частей [45].

Температуры окружающей среды влияет на нагрев, а значит и температуру частей электрической машины. При этом она может иметь колебания в зависимости от различных факторов, следовательно, необходимо нормировать не допустимую температуру частей электромашины, а величину допустимого превышения температуры их над температурой окружающей среды [2]

$$\tau = \Theta - \Theta_{oc}, \quad (3.1)$$

где Θ – текущая температура части машины;

Θ_{oc} – температура окружающей среды.

Эта величина принимается равной 40°C, если в технических условиях на электродвигатель не указаны особые условия размещения.

Условия для нагревания частей асинхронного двигателя разнохарактерны. Части обмоток расположенные во внутренних частях машины нагреваются в большей степени. Неодинаково и количество выделенной теплоты в разных режимах работы а, следовательно, направление тепловых потоков

внутри машины будет различным. Так при работе на холостом ходу теплота будет передаваться от более нагретой части (стали) двигателя к менее (его обмоткам), а в нагруженном состоянии обмотки имеют большую температуру, чем сталь, и направление теплового потока изменяется на противоположное [2].

Для тепловых расчетов электрических машин при решении общих задач нагрева нашел широкое применение метод эквивалентных тепловых схем [21, 28, 61, 137]. Как следует из этого метода, машину или ее часть разделяют на составные тела или сегменты, близкие или по материалу, или по характеру контакта с соседними элементами или средой, другими словами, имеющими одинаковые условия выделения тепла. Чем больше количество тел тепловой системы, тем возрастает точность решения. Но на точность теплового расчета влияет не только количество тел, но и, в большей степени, точность определения коэффициентов теплоотдачи с поверхностей нагрева, правильного определения теплопроводности материалов и многих факторов, которые вносят неопределенность в начальные условия. Исходя из этого, чаще всего используют упрощенные тепловые схемы замещения с малым количеством тел [120].

Простейшей считается тепловая модель с одним телом нагрева, в которой решается дифференциальное уравнение первого порядка - уравнение теплового баланса [18]:

$$C \frac{d\tau}{dt} = \Delta P - \lambda \tau , \quad (3.2)$$

где ΔP – выделяемая тепловая мощность двигателя; C – суммарная теплопроводность машины, $\text{Дж}/^\circ\text{C}$; λ – коэффициент теплоотдачи, $\text{Дж}/\text{с} \times {}^\circ\text{C}$.

Этот подход оправдан только для продолжительного режима работы электродвигателя. Предполагается, что нагрузка изменяется на небольшую величину и, тогда, определяющим фактором является величина установившегося значения превышения температуры. Как показано [136], если продолжительность включения составляет менее 30 минут, расчет нагрева этим способом существенно расходится с реальным нагревом двигателя.

Представляет определенный интерес анализ [27] поведения температуры обмотки статора в режимах с периодическим нагружением двигателя. А также сравнение динамики температуры меди статора с динамикой средней температуры всего двигателя. Для выяснения этого вопроса воспользуемся простейшей двухмассовой термодинамической моделью нагрева двигателя, где узел 1 соответствует обмотке статора, а узел 2 включает в себя остальные элементы конструкции машины. Такая схема содержит два источника тепла ΔP_1 и ΔP_2 , теплоемкости узлов C_1 и C_2 и тепловые проводимости λ_{10} и λ_{20} (от узлов 1 и 2 в окружающую среду), а также λ_{12} (между узлами 1 и 2).

Процессы в такой двухмассовой тепловой схеме описываются дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{d\tau_1}{dt} + \lambda_{11}\tau_1 - \lambda_{12}\tau_2 &= \Delta P_1; \\ C_2 \frac{d\tau_2}{dt} + \lambda_{22}\tau_2 - \lambda_{12}\tau_1 &= \Delta P_2, \end{aligned} \quad (3.3)$$

где $\lambda_{11}=\lambda_{10}+\lambda_{12}$ и $\lambda_{22}=\lambda_{20}+\lambda_{12}$; τ_1 и τ_2 – превышения температур узлов 1 и 2 над температурой окружающей среды.

Исследуем динамические свойства двухмассовой модели нагрева двигателя с использованием частотного метода. Будем считать, что электропривод работает в режиме с упорядоченным нагружением, когда в течение периода времени t_1 существуют выделяемые тепловые мощности $\Delta P_{1\max}$ и $\Delta P_{2\max}$, а в течение периода времени t_2 – выделяемые тепловые мощности $\Delta P_{1\min}$ и $\Delta P_{2\min}$. В сумме периоды t_1 и t_2 составляют повторяющийся цикл. Воспользовавшись разложением графиков выделяемой тепловой мощности в ряд Фурье, и, принимая во внимание сумму постоянной составляющей и основной гармоники, представим функции $\Delta P_1(t)$ и $\Delta P_2(t)$ в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta P_1(t) &= \Delta P_{10}(1 + k_1 \sin \Omega t); \\ \Delta P_2(t) &= \Delta P_{20}(1 + k_2 \sin \Omega t), \end{aligned} \quad (3.4)$$

где,

$$\Delta P_{i0} = \frac{\Delta P_{i\max}t_1 + \Delta P_{i\min}t_2}{t_1 + t_2}; \quad \Omega = \frac{2\pi}{t_1 + t_2}; \quad i = 1, 2;$$

$$k_i = \frac{2(t_1 + t_2)}{\pi} \cdot \frac{\Delta P_{i\max} - \Delta P_{i\min}}{\Delta P_{i\max}t_1 + \Delta P_{i\min}t_2} \sin \frac{\pi t_1}{t_1 + t_2}.$$

Задавая различные комбинации величин k_1 , k_2 , ΔP_{10} и ΔP_{20} можно воспроизводить различные особенности организации циклов нагружения для различных двигателей: цикл с отключением двигателя в паузе; цикл с остановкой двигателя в паузе, но с сохранением возбуждения; цикл без остановки двигателя с изменением выделяемой тепловой мощности, вследствие изменения нагрузки на его валу и т.д.

Найдем закон изменения превышения температуры меди статора при различных циклах нагружения. Будем считать, что тепловые проводимости λ_{10} , λ_{12} и λ_{20} имеют неизменные значения в течение всего цикла.

После затухания свободных составляющих (при $t \rightarrow \infty$, что соответствует квазиустановившемуся тепловому режиму) решение системы уравнений (3.3) определяется только принужденными составляющими и имеет следующий вид:

$$\tau_1 = \frac{e_5 \Omega^3 + (e_5 e_2 - e_4 e_1) \Omega}{\Omega^4 + (e_1^2 + 2e_2) \Omega^2 + e_2^2} \cos \Omega t + \frac{(e_4 + e_5 e_1) \Omega^2 + e_4 e_2}{\Omega^4 + (e_1^2 + 2e_2) \Omega^2 + e_2^2} \sin \Omega t - \frac{e_3}{e_2}. \quad (3.5)$$

В (3.5) обозначено:

$$e_1 = - \frac{C_1 \lambda_{22} + C_2 \lambda_{11}}{C_1 C_2}; \quad e_2 = - \frac{\lambda_{11} \lambda_{22} - \lambda_{12}^2}{C_1 C_2}; \quad e_3 = \frac{\lambda_{22} \Delta P_{10} + \lambda_{12} \Delta P_{20}}{C_1 C_2};$$

$$e_4 = - \frac{\lambda_{22} k_1 \Delta P_{10} + \lambda_{12} k_2 \Delta P_{20}}{C_1 C_2}; \quad e_5 = - \frac{k_1 \Delta P_{10}}{C_1}.$$

По выражению (3.5) нетрудно определить максимальное значение τ_1 :

$$\tau_{1\max} = \frac{\sqrt{[e_5 \Omega^3 + (e_5 e_2 - e_4 e_1) \Omega]^2 + [(e_4 + e_5 e_1) \Omega^2 + e_4 e_2]^2}}{\Omega^4 + (e_1^2 + 2e_2) \Omega^2 + e_2^2} - \frac{e_3}{e_2}. \quad (3.6)$$

В выражении (3.6) первое слагаемое определяет «размах» колебаний превышения температуры $\Delta \tau_{1\max}$, а второе слагаемое определяет среднее зна-

чение τ_{1cp} – то, которое было бы в продолжительном режиме работы при $\Delta P_1=\Delta P_{10}$ и $\Delta P_2=\Delta P_{20}$.

Используя аналогичный подход, получим выражение для максимального превышения температуры двигателя ($\tau_{max}=\Delta\tau_{max}+\tau_{cp}$) исходя из одномассовой модели его нагрева в следующем виде:

$$\tau_{max} = \frac{\Delta P_{10}k_1 + \Delta P_{20}k_2}{\sqrt{(\lambda_{10} + \lambda_{20})^2 + \Omega^2(C_1 + C_2)^2}} + \frac{\Delta P_{10} + \Delta P_{20}}{\lambda_{10} + \lambda_{20}}. \quad (3.7)$$

Различия результатов, даваемых одномассовой моделью нагрева двигателя, по сравнению с двухмассовой, при работе в режимах с периодическим нагружением не существенны [63]. Расчеты постоянных времени нагрева свидетельствуют, что при реальных соотношениях параметров двигателей большая постоянная времени T_2 очень близка к постоянной T для одномассовой тепловой модели.

Однако при некоторых комбинациях параметров тепловой модели и частотах изменения нагрузки, превышения температуры меди статора могут существенно отличаться от значений усредненной температуры, даваемых одномассовой моделью. Причем существенные расхождения наблюдаются и при относительных частотах изменения нагрузки Ω^* порядка 20...30, что для двигателей небольшой и средней мощности с постоянной $T < 1500...2000$ с соответствует величинам t_1+t_2 менее 10 минут.

Отклонения температуры меди статора от средней могут быть на 20...30 % выше, чем в одномассовой модели. Фактически это означает, что в абсолютных величинах, например, при величине τ_{1cp} , равной номинальной для изоляции класса F, разница при использовании двух рассматриваемых термодинамических моделей может достигать при указанных условиях 20...30 %, что весьма существенно в аспекте оценки ресурса изоляции.

Более точные результаты получаются в тепловой модели двигателя, где обмотки статора представляют первое тело, сталь статора и станина – это второе тело, ротор асинхронной машины является третьим телом [27]. Пред-

ставленная на рисунке 3.1 эквивалентная тепловая схема замещения асинхронного двигателя составлена для этого представления.

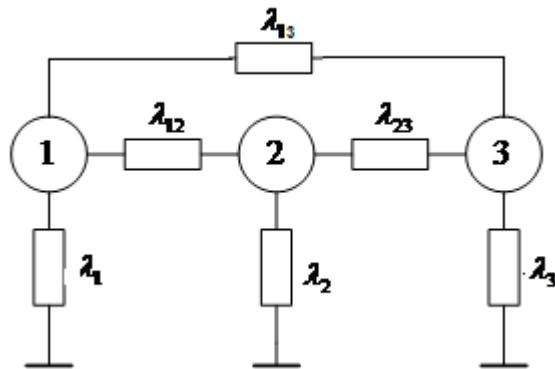


Рисунок 3.1 - Трехмассовая тепловая модель замещения асинхронного двигателя

Составим систему дифференциальных уравнений, которая будет описывать тепловое состояние машины согласно рисунка 3.1:

$$\left. \begin{aligned} C_1 \frac{d\tau_1}{dt} &= \Delta P_1 - \lambda_1 \tau_1 - \lambda_{12}(\tau_1 - \tau_2) - \lambda_{13}(\tau_1 - \tau_3); \\ C_2 \frac{d\tau_2}{dt} &= \Delta P_2 - \lambda_2 \tau_2 + \lambda_{12}(\tau_1 - \tau_2) + \lambda_{23}(\tau_3 - \tau_2); \\ C_3 \frac{d\tau_3}{dt} &= \Delta P_3 - \lambda_3 \tau_3 - \lambda_{23}(\tau_3 - \tau_2) - \lambda_{31}(\tau_3 - \tau_1). \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

Обозначения в системе уравнений следующие:

τ_1, τ_2, τ_3 – превышение температуры обмотки статора, стали и ротора выше температуры окружающей среды;

$\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$ – выделяемая тепловая мощность;

C_1, C_2, C_3 – теплоемкости тел;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – тепловая проводимость от обмоток статора, стали и ротора в окружающую среду;

$\lambda_{12}, \lambda_{13}, \lambda_{23}$ – тепловая проводимость между телами.

Для расчетов по этой системе уравнений определим все составляющие модели, т.е. теплоемкость, тепловую проводимость и потери.

Теплоемкость обмотки статора определяется по формуле:

$$C_1 = c_1 \cdot m_1, \quad (3.9)$$

где c_1 – удельная теплоемкость меди, а m_1 – масса обмотки.

Теплоемкость стали, исходя из геометрических размеров, определяется как:

$$C_2 = c_2 \cdot m_2 = c_2 \cdot \rho_2 \frac{\pi \cdot l(D - d)^2}{4}, \quad (3.10)$$

где c_2 – удельная теплоемкость стали; m_2 – масса сердечника; ρ_2 – плотность стали; D , d – диаметр статора внешний и внутренний; l – длина сердечника статора.

Третья составляющая, теплоемкости ротора определяется по формуле:

$$C_3 = c_3(m_{\text{дв}} - m_1 - m_2). \quad (3.11)$$

где c_3 – удельная теплоемкость ротора, $m_{\text{дв}}$ – масса двигателя.

В обмотке статора трехфазных асинхронных двигателей, независимо от того как соединены обмотки, выделяемая тепловая мощность определяется как произведение квадрата тока статора i_s и сопротивлением обмотки R_s :

$$\Delta P_1 = 3 \cdot i_s^2 R_s. \quad (3.12)$$

Так как сопротивление обмотки зависит от ее температуры уравнение (3.12) принимает вид:

$$\Delta P_1 = 3 \cdot i_s^2 R_s [1 + \gamma(\tau_1 - 20)], \quad (3.13)$$

где γ – температурный коэффициент сопротивления (для обмотки, изготовленной из меди $\gamma = 0,004 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Выделяемая тепловая мощность в стали статора определяются перемагничиванием от основного потока асинхронного двигателя и могут быть определена как [81]:

$$\Delta P_2 = k_n \cdot p_{1/50} \left(\frac{f_c}{50} \right)^{1,3} B^2 \cdot m_2, \quad (3.14)$$

где k_n – коэффициент неравномерности распределения потока по сечению магнитопровода; $p_{1/50}$ – удельные потери в стали при индукции 1 Тл и при частоте сети 50 Гц; B – среднее значение индукции.

Выделяемая тепловая мощность ротора являются суммой из магнитных потерь в стали ротора и электрических потерь в обмотке. Потери в пусковых режимах определяются электрическими потерями в обмотках, и они

наибольшие. Они во много раз превышают потери в номинальном режиме, поэтому если не учитывать потери в стали ротора при больших скольжениях существенного увеличения погрешности в расчете не будет[120]. Тогда выделяемую тепловую мощность в роторе можно определить, как и в (3.13):

$$\Delta P_3 = 3 \cdot i_r^2 R_r [1 + \gamma(\tau_3 - 20)]. \quad (3.15)$$

В соответствии с методиками расчетов, показанными в [21, 61], по величинам геометрических размеров, свойств материалов статора, ротора и обмоточным данным, а также других параметров проведём расчет значений тепловой проводимости между телами модели. Значения представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1.- Параметры тепловой модели

тело	1	2	3	1-2	2-3
Тепловые проводимости, Вт/°C	14,98	8,55	9,03	9,74	1,91
Теплоемкости, Дж/°C	753	3131	9718		

Структурная схема тепловой модели асинхронного двигателя представлена на рисунке 3.2. Она была построена по выражениям (3.8), (3.12)-(3.15).

Для проверки адекватности этой модели рассчитывались тепловые процессы в двигателях серии 5А. Полученные результаты (таблица 3.2) сравнили с результатами, представленными в [28]. Расхождения связаны с тем как были определены основные параметры в тепловой модели (определение теплоемкости и тепловых проводимостей). Аналогичные результаты показаны и в [104].

На основании анализа данных, представленных в таблице 3.2 можно заключить, что по предложенной трехмассовой модели можно с ошибкой, не превышающей 5 % рассчитать тепловые процессы в асинхронных двигателях и использовать для дальнейших исследований.

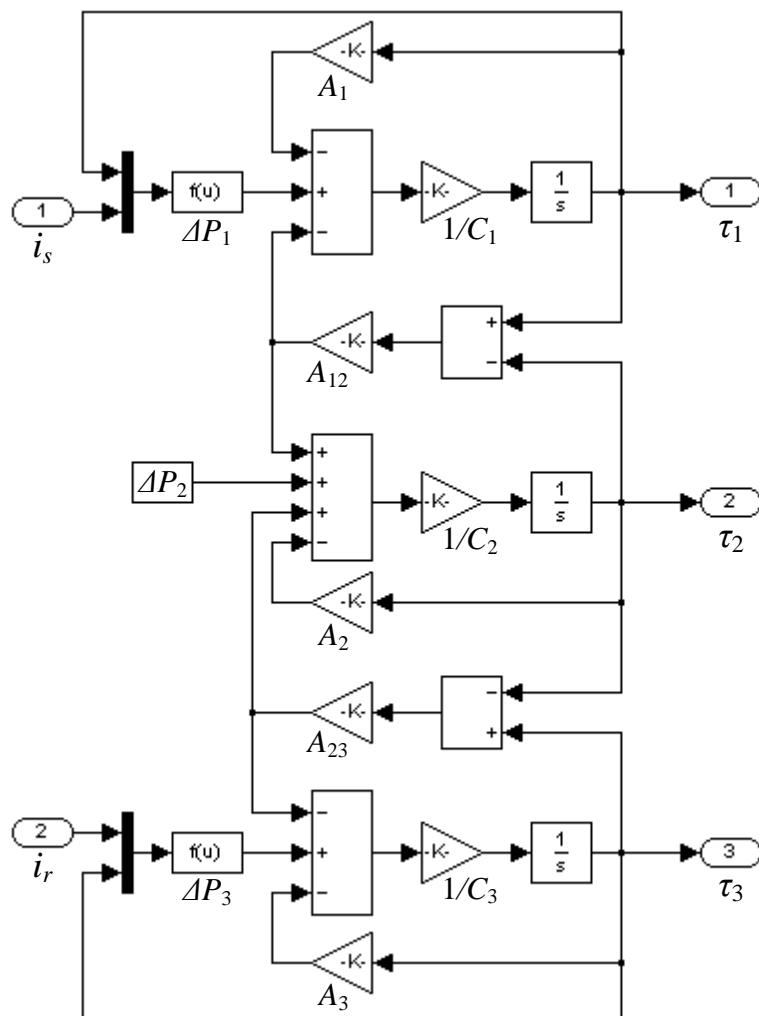


Рисунок 3.2 - Трехмассовая тепловая модель асинхронного двигателя

Таблица 3.2.- Превышение температуры обмотки статора в АД серии 5А

Тип двигателя	Превышение температуры обмотки статора, °C		Ошибка, %
	данные из [28]	расчетные значения	
5АН225М4	52,2	54,5	4,4
5АН225М6	50	52,4	4,8
5АН250М6	54	55,7	3,1
5АН250С8	59,9	61,9	3,3
5АН250М8	60	62,7	4,5

3.2. Разработка конечно-элементной тепловой модели

3.2.1. Возможные пути реализации тепловой модели

Имея конечно-элементную модель АД, можно построить модель, рассчитывающую совместно электромагнитные, электромеханические и тепловые процессы. При этом значения токов в обмотках двигателя и параметры

магнитного поля являются входными данными для определения тепловыделения при расчете тепловых явлений. На основе рассчитанных температур определяется изменение сопротивления обмоток двигателя, что учитывается при расчете электромагнитных и электромеханических процессов.

Возможна реализация модели, совмещающей обе возможности в зависимости от того, что требуется в конкретном случае.

В тепловой модели АД предполагается учет следующих явлений:

- джоулев 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, в такой модели будем видеть температурное поле в любом поперечном сечении двигателя.

Основные проблемы, возникающие при разработке тепловой модели АД:

1. Задание геометрии расчетной области. Метод конечных элементов в двумерной постановке позволяет рассчитывать плоскопараллельные поля. Температурное поле двигателя не является плоскопараллельным, то есть различное в разных сечениях двигателя. Поэтому требуется постановка задачи в трехмерной области.

2. Модель типа "слоеный пирог". Трехмерная расчетная область двигателя разбивается поперечными сечениями на n слоев. При этом температурное поле в каждом слое считается плоскопараллельным. В зависимости от требуемой точности расчета и быстродействия можно выбирать разное число слоев n . При реализации данного подхода возникают проблемы учета тепло-

обмена между слоями, то есть в направлении оси вращения двигателя, учета теплообмена между слоями в торцевых частях двигателя и окружающей средой, расчета температур в торцевых частях двигателя (лобовых частях статорных обмоток и др.)

3. Трехмерная тепловая модель с использованием метода конечных элементов в трехмерной постановке. При этом треугольные конечные элементы двухмерной расчетной области заменяются тетраэдрами и параллелепипедами в трехмерной области. Данный подход позволяет автоматически учесть теплообмен внутри двигателя вдоль оси вращения, тепловые процессы в торцевых частях двигателя, включая определение температуры в лобовых частях статорных обмоток.

3.2.2. Тепловое представление закрытой асинхронной машины

Схема асинхронной машины представлена на рисунке 3.3. Ротор вращает вентилятор, расположенный на конце вала, который подает поток воздуха, на внешнюю поверхность статора. Это и есть площадь обмена с внешней средой, площадь увеличена ребрами, которые усиливают теплообмен.

Передача тепла между основными частями во внутренней части асинхронного двигателя обусловлена только проводимостью внутреннего воздуха. Все изолирующие материалы, использованные в машине, создают только препятствие выделению тепла. Ротор вращается, увлекая за собой воздух внутри машины, который служит посредником для передачи тепла во все внутренние части машины. Поток тепла транспортируется с оконечностей основных частей (поверхность ротора, внешние поверхности катушек статора) к фланцам.

В отсутствие осевого движения воздух, заключенный в ограниченном воздушном зазоре, переносит тепло с площади ротора к статору, главным образом, за счет конвекции.

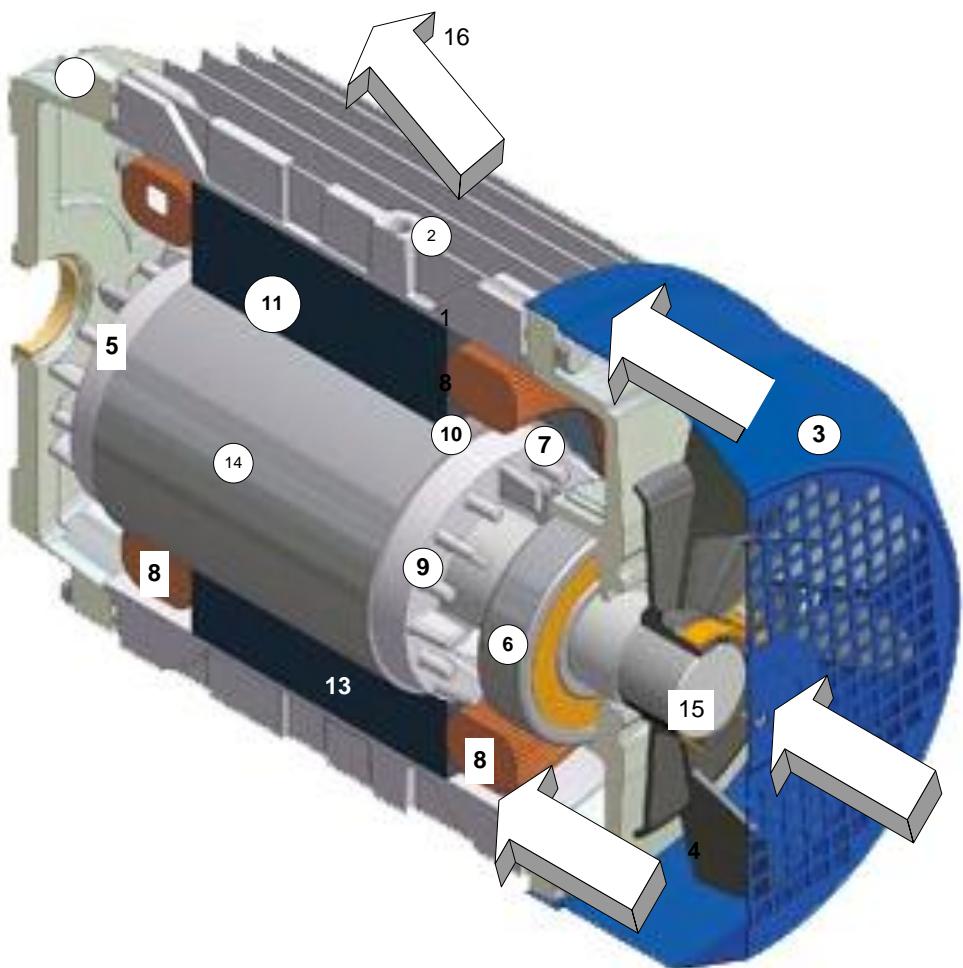


Рисунок 3.3. - Передача тепла в закрытой асинхронной машине и его источники:

1 – корпус статора (станина), 2 – ребра статора, 3 – кожух вентилятора, 4 – вентилятор, 5–фланец, 6–подшипник, 7–воздух в лобовой и торцевой частях, 8–торцевые и лобовые части обмотки статора, 9–кольцо ротора, 10 воздушный зазор, 11–железо статора, 12–внутренние части обмотки статора, 13–железо ротора, 14–стержни ротора, 15–вал двигателя, 16–окружающий воздух

Различные потери, вызывающие нагрев асинхронного двигателя (механической части, тепловые и потери в железе) могут быть определены в основных частях:

- тепловые потери присутствуют в статоре и корпусе ротора;
- магнитные потери ротора и статора это потери в железе;

- механические потери вызваны трением в подшипниках, трением воздуха в воздушном зазоре (аэродинамические потери) и из-за вращения лопастей вентилятора, установленного на конце вала.

3.3. Эквивалентная тепловая схема асинхронного двигателя

В электрической машине, места, на которые должно быть обращено пристальное внимание – обмотки статора и ротора, так как они подвержены сильным тепловым воздействиям.

3.3.1. Эквивалентная поперечная проводимость обмоток

Обмотки электрических машин изготовлены, как правило, из медных проводов, покрытых слоем изолирующей эмали. Провода размещены в пазах, где они утоплены в смоле (пропитке из огнестойкого состава). Эквивалентная поперечная проводимость обмотки, покрытой лакокрасочным составом, может быть определена, используя следующее выражение [63]:

$$A_{bt} = F * A_v, \quad (3.16)$$

где A_{bt} – поперечная эквивалентная тепловая проводимость обмотки статора;

A_v – тепловая проводимость изолирующего лака;

F – коэффициент, который зависит от процента меди в пазу, рисунок 3.4.

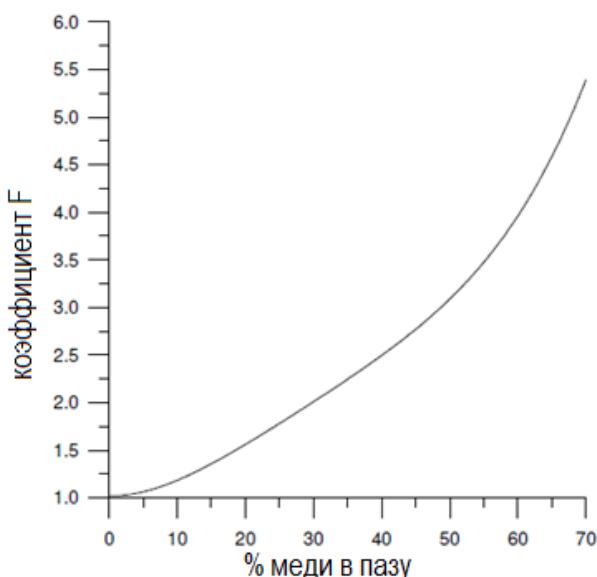


Рисунок 3.4. - Поперечная проводимость проводников обмотки статора

3.3.2. Эквивалентная проводимость подшипников

В машине, как правило, используются закрытые подшипники. Из-за особенной геометрии, и его вращения при работе машины, а также контактов, между шариками и смазочным материалом, это место является самым трудным для определения эквивалентной проводимости. Некоторые работы, как например [200], предлагают формулы, чтобы считать эквивалентное тепловое сопротивление в зависимости от оборотов вращения. Эта зависимость от скорости вращения используется в настоящей модели.

3.3.3. Термическое сопротивление контакта

В электрической машине, на уровне соприкосновения станины с железом статора, появляется термическое сопротивление контакта. Чтобы моделировать это сопротивление, необходимо определить, как и для конвекции, эквивалентную термическую проводимость. Эта зависимость представлена на рисунке 3.5 [193].

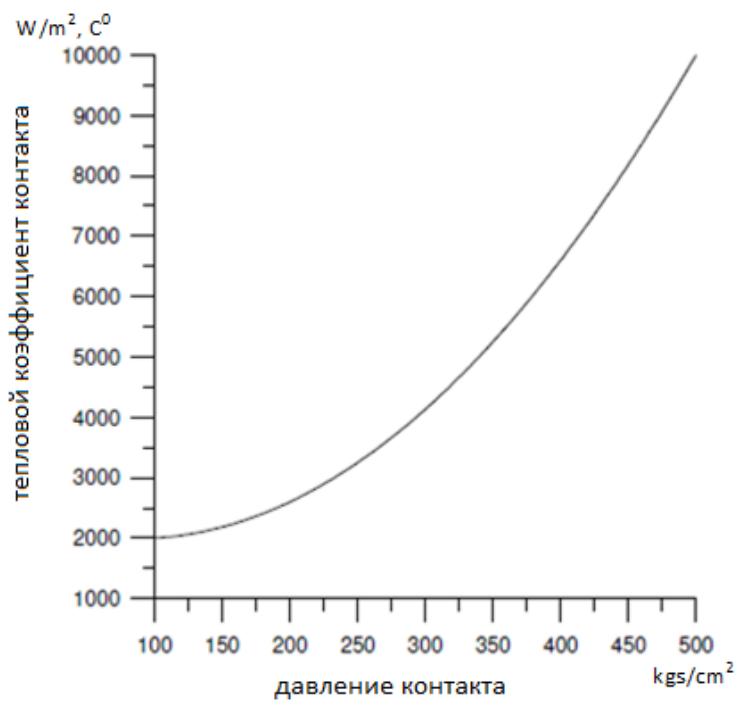


Рисунок 3.5. - Термическая проводимость для материала сталь – алюминий
[193]

3.3.4. Определение коэффициентов теплоотдачи конвекцией

Необходимо определять коэффициент теплоотдачи в следующих местах асинхронного двигателя: между станиной и воздухом, в воздушном зазоре и торцевой части машины. Как правило, в тепловых моделях определяют только последний коэффициент. Это допущение не совсем правомочно, так как необходимо определять столько коэффициентов, сколько площадей контакта с воздухом.

Коэффициент теплоотдачи между станиной и окружающим воздухом

Станина представляет собой внешнею оболочку машины и имеет конструктивно ребра для усиления передачи тепла. Присутствие их и их особенности, делают расчет коэффициента теплообмена между станиной – окружающим воздух крайне затруднительным. В литературе существует достаточно много аналитических подходов, позволяющих определять этот коэффициент. Между тем, наш подход состоит в том, что все тепло, генерированное в двигателе, передается к окружающему воздуху через статор. Для этого выражим термическое сопротивление R_a в зависимости от разных факторов. С одной стороны, мы запишем R_a в зависимости от температуры и потерь:

$$R_a = \frac{\Theta_s - \Theta_a}{P_{tot}} \quad (3.17)$$

и с другой стороны, из геометрических размеров, R_a можно определить как:

$$R_a = \frac{1}{2\pi r_c L_c h_a}. \quad (3.18)$$

Для этих двух последних соотношений:

R_a – представляет термическое сопротивление статор – окружающий воздух;

P_{tot} – общие потери машины;

Θ_s – представляет собой среднюю температуру, измеренную на статоре;

Θ_a – температура, окружающего воздуха;

L_c – осевая длина статора;

r_c – внешний радиус статора;

h_a – коэффициент теплообмена между окружающим воздухом и стато-
ром.

Рассмотрим определение коэффициента теплообмена в воздушном
зазоре.

Воздушный зазор может моделироваться как пространство, заключен-
ное между двумя соосными цилиндрами, рисунок 3.6. Внутренний цилиндр
вращается и в отсутствие осевого перемещения, коэффициент теплообмена
может быть получен из соотношений, входящих в ряд Тэйлора. Таким обра-
зом, получаем [186, 200] из критерия Нуссельта:

$$\begin{cases} Nu = 2,2 \text{ при } Ta < 41 \\ Nu = 1,11Ta^{0,63}Re^{0,27} \text{ при } 41 < Ta < 100 \end{cases} \quad (3.19)$$

В этих соотношениях $Ta = Re \left(\frac{2e}{d_1} \right)^{\frac{1}{2}}$ – коэффициент из ряда Тейлора,
 $Re = \frac{\omega d_1 e}{2v}$ представляет собой число Рейнольдса.

Критическое значение 41 в ряде Тэйлора соответствует переходу от
режима ламинарного к турбулентному. Число Рейнольдса как критерий пере-
хода от ламинарного к турбулентному режиму течения и обратно относи-
тельно хорошо действует для напорных потоков. При переходе к безнапор-
ным потокам, переходная зона между ламинарным и турбулентным режи-
мами возрастает, и использование числа Рейнольдса как критерия не всегда
правомерно. Если принять, что воздушный зазор равен 0,4 мм и для гаммы
скоростей меньших 3000 об/мин, коэффициент Тэйлора всегда, ниже 41, так,
что $Nu=2,2$. Тогда, коэффициент теплообмена в воздушном зазоре можно
представить как:

$$h_e = \frac{2.2k_{air}}{e}. \quad (3.20)$$

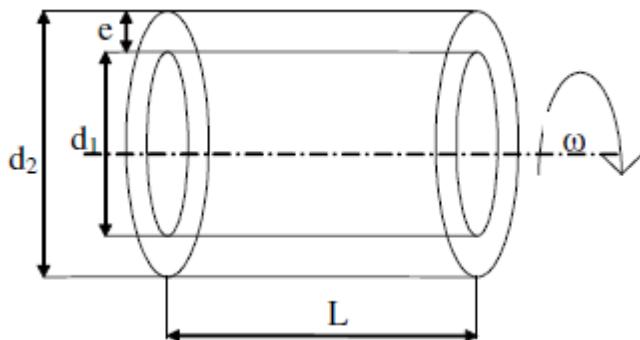


Рисунок 3.6. - Цилиндрические площади вращения в воздушном зазоре

Коэффициент теплообмена для торцевой части машины можно определить из следующих соображений.

Движение воздуха вызвано вращением короткозамкнутого ротора, на торцах которого имеются выступы для того, чтобы усиливать движение воздуха. Можно воспользоваться результатами, полученными в [186]:

$$h_i = 13,5(0,39u + 1), \quad (3.21)$$

при этом u – скорость вращения воздуха. Эта скорость определяется из соотношения:

$$u = r_m \omega_r \eta_v h_i, \quad (3.22)$$

где r_m – средний радиус кольца окружности ротора;

ω_r – скорость вращения ротора;

η_v – коэффициент ребристости, образованного торцом ротора, у которого есть выступы. Он может, оценен примерно в 50 %.

3.4. Моделирование тепловых режимов асинхронного двигателя

Электрическая машина имеет сложную термическую систему, но может быть представлена в виде симметричной системы, имеющей периодичность. Применим допущение – различные активные части могут вписаться в геометрию цилиндрической формы. Тогда для этой простой геометрии, решение дифференциальных уравнений теплопередачи позволяет получить точное распределение температуры.

3.4.1. Элементарная термическая окружность сектора пустого цилиндра

Рассмотрим часть цилиндра осевой длины L с углом α (рисунок 3.7.), принимая следующие допущения:

- температура независима от угла;
- потоки тепла в осевом и радиальном направлениях независимы;
- средние температуры в радиальном и осевом направлениях идентичны;
- термические проводимости в радиальном и осевом направлениях постоянны;
- плотность потерь в части цилиндра есть и постоянна. Температуры (Θ_1, Θ_2) относятся к радиальному направлению, а температуры (Θ_3, Θ_4) – к осевому направлению.

Для термической окружности, эквивалентной осевому направлению, уравнение теплоотдачи запишется в виде:

$$\frac{d^2\Theta}{dz^2} + \frac{W_v}{k_a} = 0, \quad (3.23)$$

где W_v – объемная плотность потерь;

k_a – коэффициент теплопроводности в осевом направлении.

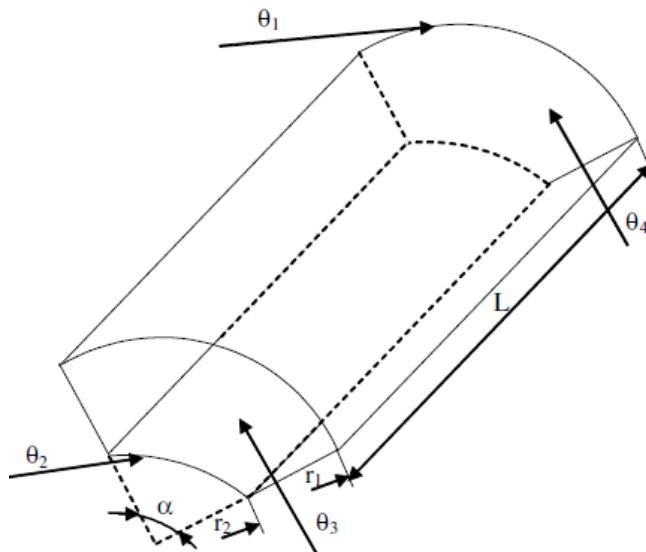


Рисунок 3.7. - Представление 3D сектора цилиндра

Аналитическое решение (3.23) позволяет определять термическую окружность в осевом направлении, (рисунок 3.8). На этом рисунке, Θ_{moy} представляет среднюю температуру сектора цилиндра в осевом направлении, при этом различные термические сопротивления определяем из выражений:

$$\begin{aligned} R_{1a} &= \frac{R_0}{2} = \frac{L}{\alpha k_a(r_1^2 - r_2^2)}; \\ R_{2a} &= \frac{R_0}{2} = \frac{L}{\alpha k_a(r_1^2 - r_2^2)}; \\ R_{3a} &= \frac{R_0}{6} = \frac{-L}{3\alpha k_a(r_1^2 - r_2^2)}, \end{aligned} \quad (3.24)$$

где R_0 – термическое сопротивление теплопередачи в осевом направлении:

$$R_0 = \frac{2L}{\alpha k_a(r_1^2 - r_2^2)}.$$

Если распределение температуры симметрично по отношению к оси вращения ротора ($\Theta_3 = \Theta_4$), можно ограничиться рассмотрением в середине осевой длины. Получается термическая окружность рисунок 3.9., где термическое сопротивление Ra_m определяется из выражения:

$$Ra_m = \frac{L}{3\alpha k_a(r_1^2 - r_2^2)}. \quad (3.25)$$

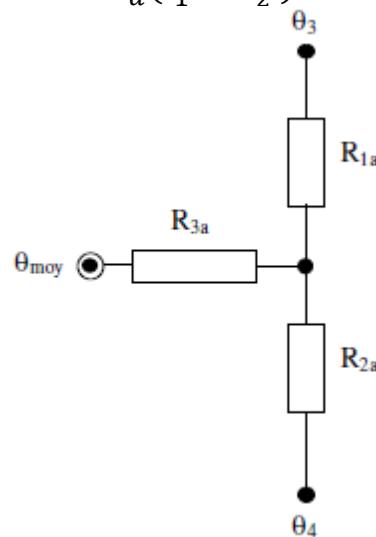


Рисунок 3.8. - Термическая окружность, эквивалентная осевому направлению

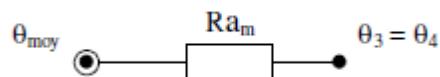


Рисунок 3.9. - Эквивалентная термическая окружность с симметрией

Термическая окружность, эквивалентная радиальному направлению определяется из следующих соображений.

Уравнение теплоотдачи в радиальном направлении запишется в виде:

$$\frac{d^2\Theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\Theta}{dr} + \frac{W_v}{k_r} = 0. \quad (3.26)$$

k_r – коэффициент теплопроводности в радиальном направлении. Решение (3.26) позволяет установить термическую окружность, эквивалентную радиальному направлению. В случае симметрии, мы получаем термическую окружность рисунок 3.10, где различные термические сопротивления получаются из выражений:

$$Rr_1 = \frac{1}{\alpha k_r L} \left[1 - \frac{2r_2^2 \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{r_1^2 - r_2^2} \right]. \quad (3.27)$$

$$Rr_2 = \frac{1}{\alpha k_r L} \left[\frac{2r_2^2 \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{r_1^2 - r_2^2} - 1 \right]. \quad (3.28)$$

$$Rr_m = \frac{-1}{2\alpha(r_1^2 - r_2^2)k_r L} \left[r_1^2 + r_2^2 - \frac{4r_1^2 r_2^2 \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{r_1^2 - r_2^2} \right]. \quad (3.29)$$

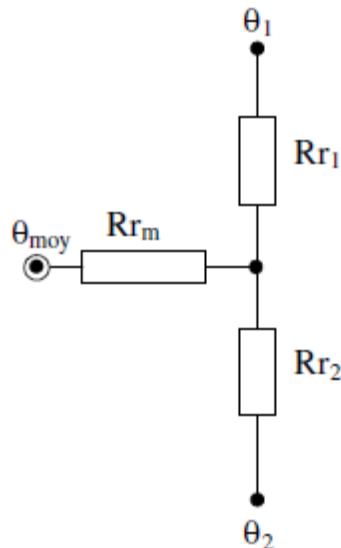


Рисунок 3.10. - Термическая окружность, эквивалентная радиальному направлению

Для того чтобы теперь получить общую термическую окружность сектора цилиндра, достаточно соединить термические сети рисунок 3.9. и рисунок 3.10., средняя температура может быть определена в каждом направлении. Результат объединения – термическая окружность представлена на рисунке 3.11. Потери P , имеющие место включены в точку Θ_{moy} (в среднюю температуру). Они эквивалентны, на схеме, источнику питания. Для моделирования сектора полного цилиндра, достаточно исключить сопротивление Rr_2 и приравнять r_2 к 0 в (3.27) и (3.29).

3.4.2. Разбиение асинхронной машины на блоки

Разбивая машину на элементарные термические модули, внедренные в сектора цилиндра, для того, чтобы описать полную конечно-элементную термическую модель двигателя. Для этого, разделяем машину на цилиндрические блоки. Термическая модель, которая будет разработана, должна иметь достаточно простой вид (обмотки статора, стержни ротора, магнитные цепи статора и ротора) и связи между ними и с окружающей средой. Тонкие эле-

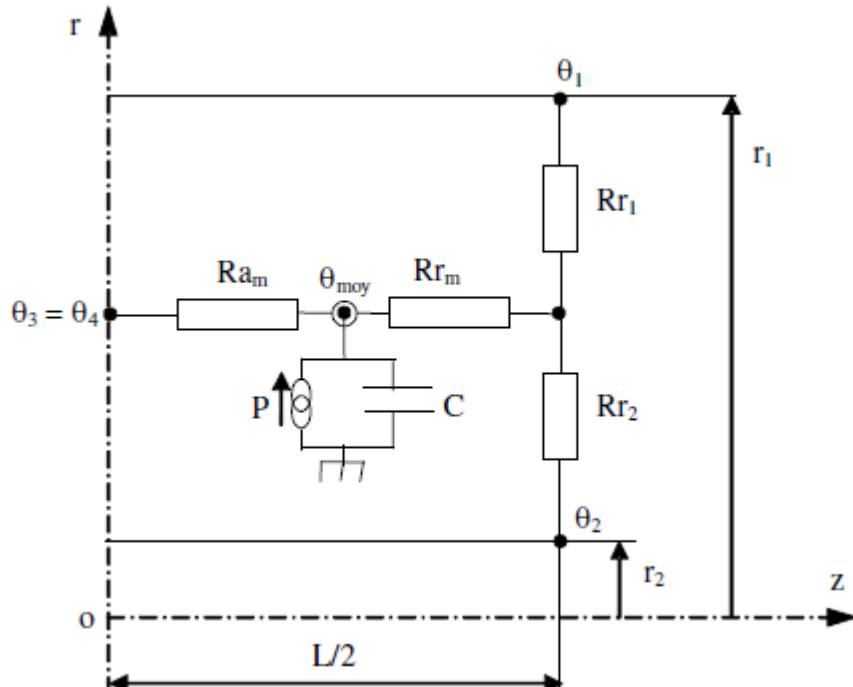


Рисунок 3.11. - Эквивалентная термическая окружность сектора пустого цилиндра

менты как листы изоляции статора могут быть представлены простыми термическими сопротивлениями. В этой модели асинхронный двигатель разбивается на одиннадцать блоков, придерживаясь к карте термических обменов рисунок 3.12. Это разбиение включает одиннадцать блоков: 1 – корпус статора, 2 – статор, 3 – зубцы статора, 4 – катушки статорной обмотки, 5 – торцы катушек, 6 – стержни ротора, 7 – железо ротора, 8 – вал, 9 – подшипники, 10 – воздушный зазор, 11 – воздух внутри двигателя.

3.4.3. Общая эквивалентная термическая схема асинхронной машины

Общая эквивалентная термическая сеть асинхронной машины представлена на рисунке 3.13. 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

Уравнения модели можно записать следующим образом:

$$[C]\{\Theta_1\} + [G_{11}]\{\Theta_1\} + [G_{12}]\{\Theta_2\} = \{P_1\}. \quad (3.30)$$

$$[G_{21}]\{\Theta_1\} + [G_{22}]\{\Theta_2\} = 0. \quad (3.31)$$

где $[C]$ – диагональная матрица термических проводимостей размера (9×9) ;

$[G_{11}], [G_{12}], [G_{21}], [G_{22}]$ – матрица тепловой проводимости;

$\{\Theta_1\}, \{\Theta_2\}$ – векторы неизвестных температур;

$\{P_1\}, \{P_2\}$ – векторы источников тепла (потерь), отметим, что $\{P_2\}=\{0\}$.

Системы уравнений (3.30) и (3.31) преобразуем к дифференциальной системе вида:

$$\{\dot{\Theta}_1\} + [G_{eq}]\{\Theta_1\} = \{F_1\}, \quad (3.32)$$

где

$$\{F_1\} = [C]^{-1}\{P_1\}$$

$$[G_{eq}] = [C]^{-1}([G_{12}][G_{22}]^{-1}[G_{21}])$$

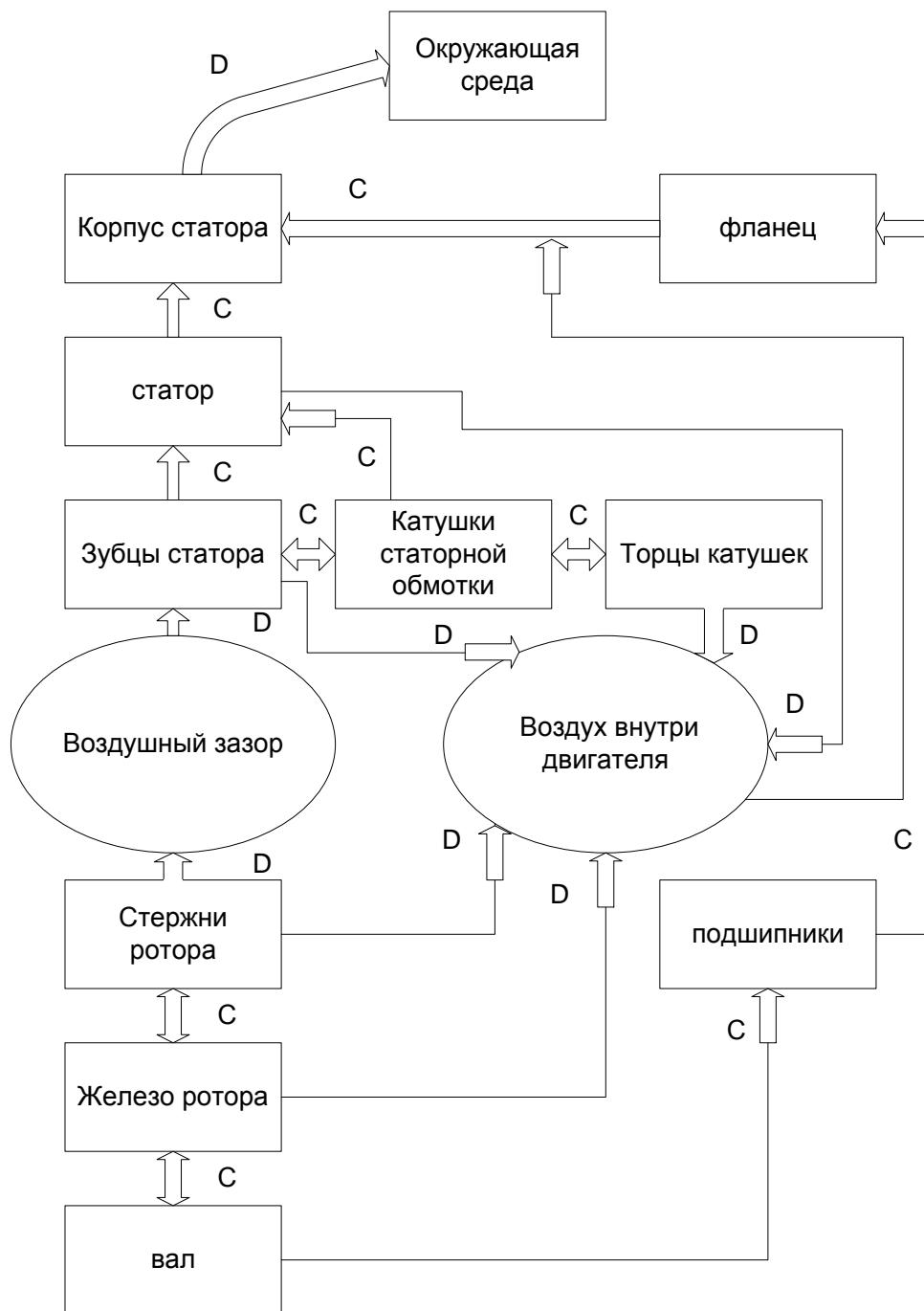


Рисунок 3.12. - Карта термических обменов в асинхронной машине,

где С – термическая проводимость, D – конвекция

термические особенности каждого блока внесены в центральный узел блока, пренебрегая термическими способностями воздуха и изоляционных материалов.

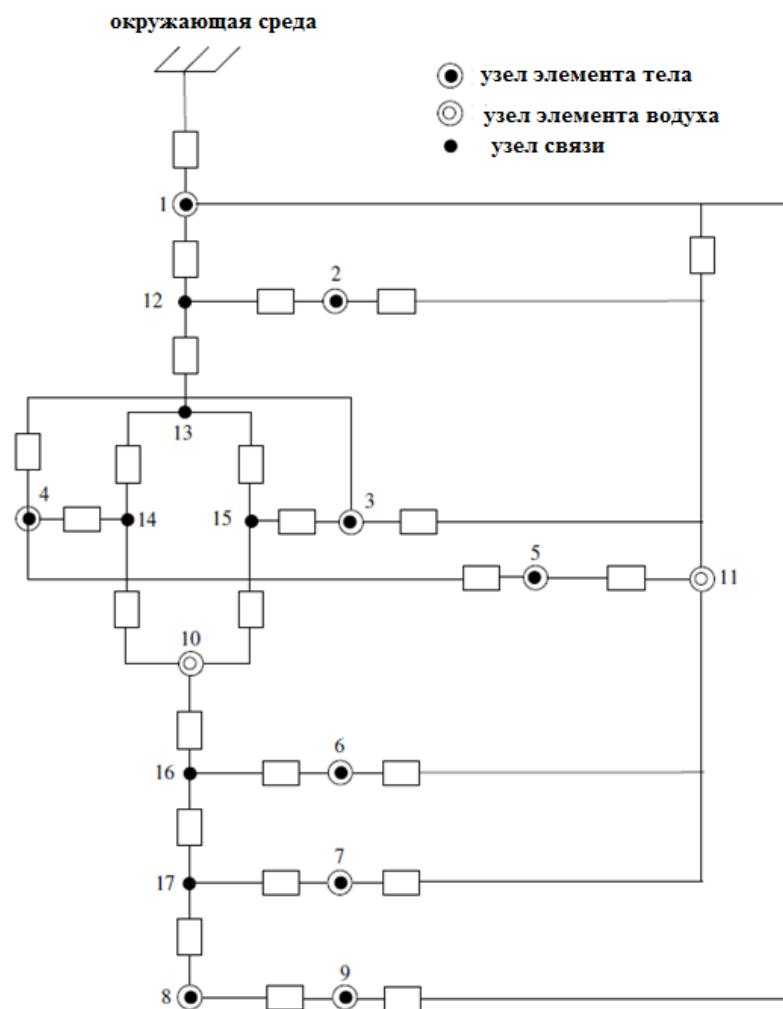


Рисунок 3.13. - Эквивалентная термическая сеть асинхронного двигателя

Эквивалентная термическая сеть асинхронного двигателя (рисунок 3.13) включает 17 узлов:

- номера узлов от 1 до 9 соответствуют основным, рассмотренным выше 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 системы (3.32) позволяет получить вектор $\{\Theta_1\}$ и затем вектор $\{\Theta_2\}$ используя (3.31).

3.4.5. Метод решения

В матрицу $[G_{eq}]$ дифференциальной системы (3.32), включаются отрицательные элементы. Использование явных методов для решения этой системы ведет к проблемам стабильности решения. Метод, который используется, имеет аналитическое решение, полученное из диагональной матрицы $[G_{eq}]$. Это, так называемый, модальный метод суперпозиции. Алгоритм решения при этом следующий. Систему уравнений (3.32) можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} \{\Theta_1\} + [G_{eq}]\{\Theta_1\} = \{F_1\} & t > t_0 \\ \{\Theta_1(t_0)\} = \{\Theta_{10}\} & t = t_0 \end{cases}. \quad (3.33)$$

Представим $\{\Theta_1\}$ в виде:

$$\{\Theta_1\} = [X]\{V\}. \quad (3.34)$$

при этом $[X]$ – является матрицей преобразования, созданного 9 векторами $[G_{eq}]$. Она удовлетворяет соотношению ортогональности:

$$[X]^{-1}[G_{eq}][X] = [\lambda], \quad (3.35)$$

где $[\lambda]$ – диагональная матрица собственных значений $[G_{eq}]$, используя (3.34) и (3.35), система (3.33) преобразуется:

$$\begin{cases} \{V\} + [\lambda]\{V\} = \{\tilde{F}\} & t > t_0 \\ \{V\} = \{V_0\} & t = t_0 \end{cases}, \quad (3.36)$$

где:

$$\{\tilde{F}\} = [X]^{-1}\{F_1\}$$

$$\{V_0\} = [X]^{-1}\{\Theta_{10}\}$$

Решение i -того уравнения (3.36) запишется в виде:

$$V_i(t) = V_i(t_0) \exp(-\lambda_i(t - t_0)) \left(V_i(t_0) + \int_{t_0}^t \exp \lambda_i(s - t_0) \tilde{F}_i(s) ds \right) \quad (3.37)$$

В случае если \tilde{F}_i постоянны (постоянные потери), расчет полного значения в (3.36) оказывается облегченным и окончательное решение получается в виде:

$$V_i(t) = V_i(t_0) \exp(-\lambda_i(t - t_0)) + \frac{\tilde{F}_i}{\lambda_i} (1 - \exp(-\lambda_i(t - t_0))) \quad (3.38)$$

Температуры в различных блоках рассчитываются по формулам (3.34).

3.4.6. Определение и локализация источников тепла

Любые потери в машине создают источники тепла и, соответственно, термические проблемы. При продолжительном режиме работы S1 – это работа машины при неизменной нагрузке P и потерях P_v достаточно длительное время и достигается максимальная температура всех её частей (Θ_{max}). Нормы предусматривают несколько типов испытаний, которые позволяют определить потери в асинхронном двигателе [123], [143]. При работе с переменной нагрузкой, потери меняются в зависимости от нагрузки и времени работы. В этом случае необходимо рассмотреть связь между моделями конечно-элементной и тепловой конечно-элементной моделью. Если тепловые постоянные времени много больше, чем электромагнитные постоянные времени, мы можем говорить о слабой их взаимосвязи. Потери оцениваются в электромагнитной модели. Зная что, сопротивление ротора и статора изменяется, то поправку на температуру следует брать из тепловой модели. Изменение сопротивления роторной клетки (алюминий) и обмотки статора (медь) является линейной функцией температуры (температурный коэффициент постоянен). Соответствующий алгоритм показан на рисунке 3.14.



Рисунок 3.14. - Алгоритм соединения электромагнитной и термической моделей асинхронного двигателя

3.5. Экспериментальные исследования тепловых режимов

Для решения задачи нагрева составных частей асинхронного двигателя необходимо, например, в программе *SolidWorks* (программа 3D графики) на-чертить разрез асинхронного двигателя, как мы, например, провели для дви-гателя 4АХ80А4КУ3 (рисунок на 3.15).

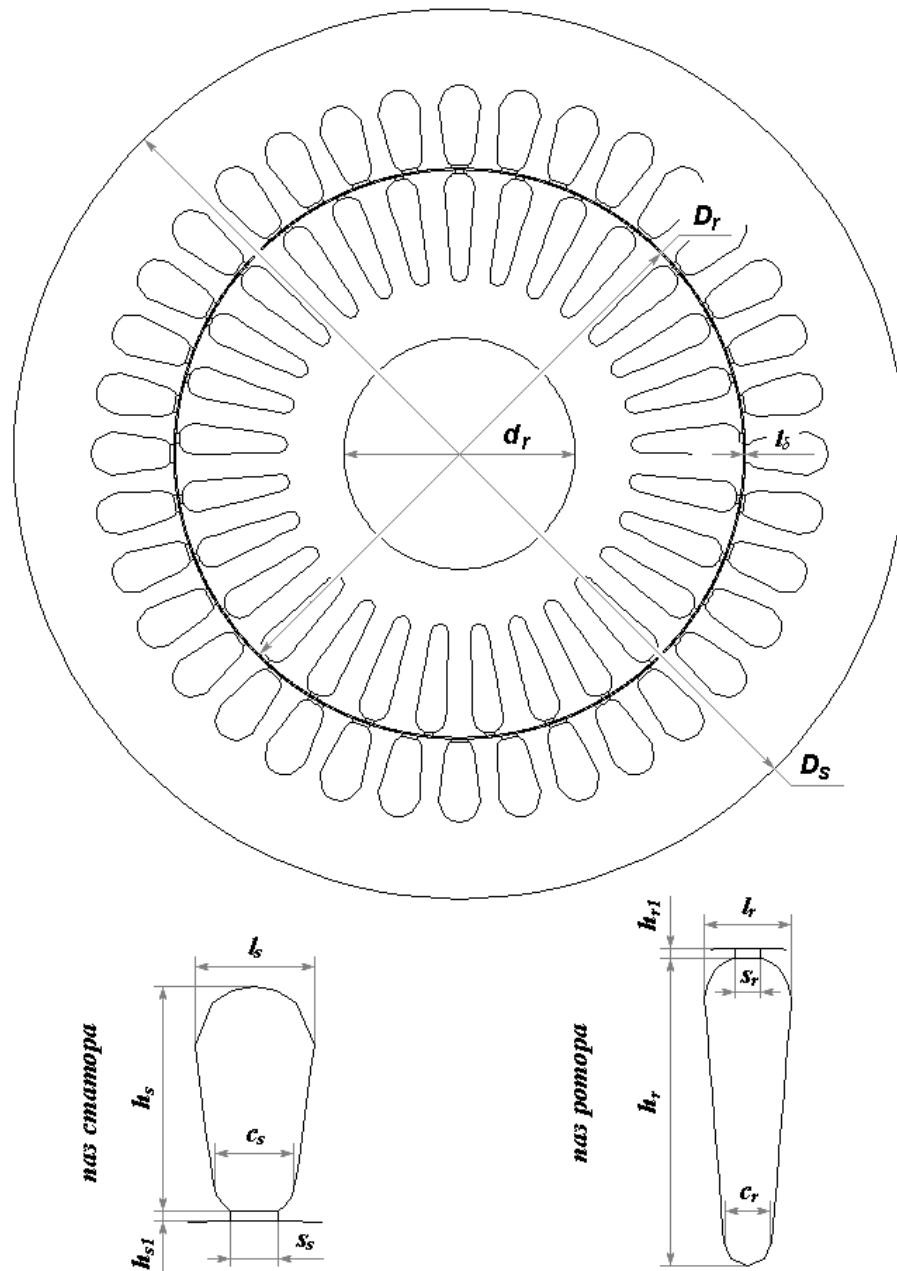


Рисунок 3.15. - Геометрические размеры двигателя 4АХ80А4КУ3

Параметры машины приведены в таблице 3.3.

Смоделируем в разработанной программе тепловой модели нагрев ос-новных узлов за 240с и приведем графики нагрева основных узлов машины (рисунок 3.16). Для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и

Таблица 3.3- Параметры двигателя 4AX80A4КУ3

<i>Параметр</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Величина</i>
Номинальная мощность	P_n , Вт	0,55
Номинальная частота вращения	ω_n , об/мин	1400
Диаметр активной стали статора	D_s , мм	131
Наружный диаметр активной стали ротора	D_r , мм	84
Внутренний диаметр активной стали ротора	d_r , Окончание таблицы 3.3	
Ширина воздушного зазора	l_δ , ...	~,~
Длина активного пространства двигателя	l , мм	57
Размеры паза статора	s_s , мм	2,5
	h_s , мм	11,7
	h_{s1} , мм	0,5
	c_s , мм	4,4
	l_s , мм	6,2
Размеры паза ротора	s_r , мм	1,3
	h_r , мм	16
	h_{r1} , мм	0,5
	c_r , мм	4,5
	l_r , мм	2,5
Число пазов статора	N_s	36
Число пазов ротора	N_r	29
Число пар полюсов	P	2
Число обмоточных групп на фазу полюса	q	3
Число витков в пазе статора	W	135
Активное сопротивление фазы обмотки статора	R_s , Ом	11,5
Тип статорной обмотки	Однослойная, петлевая, соединение "звезда"	

алюминиевой обмоткой ротора с классом нагревостойкости F имеем максимальный нагрев до 117 градусов Цельсия торец обмотки статора за время 12 мин.

Для проверки адекватности работы программы конечно-элементной тепловой модели воспользуемся тепловизором SDS HotFind-D. Термограмма работы асинхронного двигателя в длительном режиме работы представлена на рисунке 3.17. Как видно из рисунка наиболее нагретыми частями в этом режиме является ротор двигателя 48.7°C , а на графике 50°C , что говорит

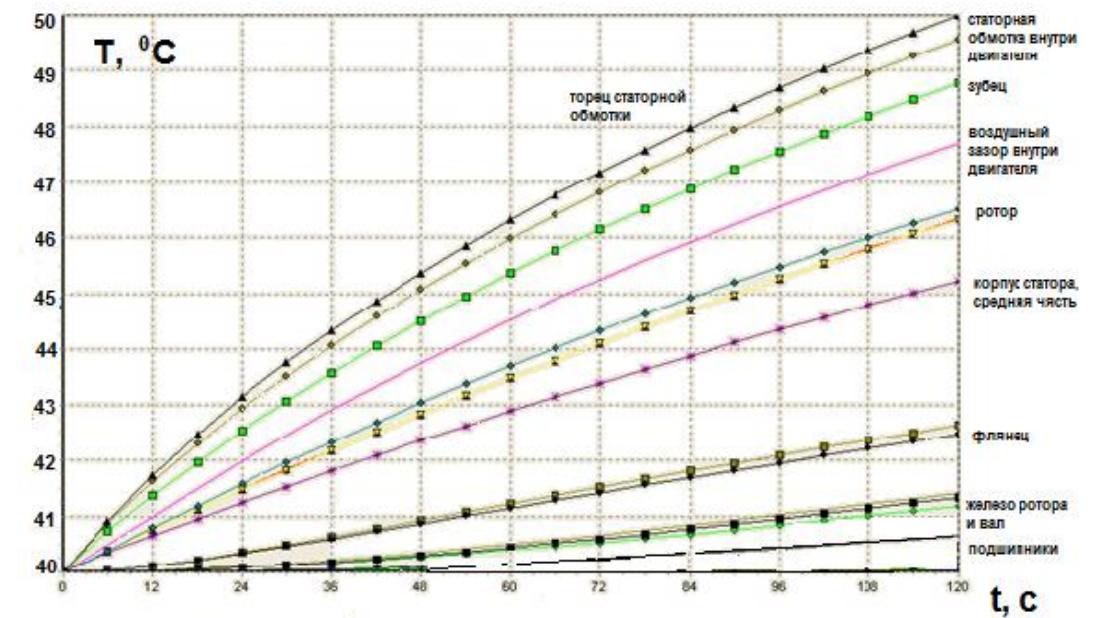


Рисунок 3.16. - Графики нагрева основных узлов асинхронного двигателя при пуске



Рисунок 3.17. - Термограмма асинхронного двигателя 4АХ80А4КУ3 в длительном режиме работы

об адекватности модели. Наиболее нагретыми частями АД при пуске являются лобовые части статорной обмотки и часть статорной обмотки внутри двигателя.

3.6. Анализ влияния времени пуска и температурного режима обмоток на ресурс двигателя

Продолжительность службы изоляции можно выразить уравнением [73]:

$$\tau = T_0 e^{-b\vartheta}, \quad (3.39)$$

где τ и T_0 – τ – срок службы изоляции при температуре ϑ , лет; T_0 – условный срок службы изоляции при $\vartheta = 0$ ($T_0 = 6,225 \cdot 10^4$ лет при $\vartheta = 105^\circ\text{C}$); $b=0,088$, что аналогично снижению в сроке службы изоляции на каждые 10°C увеличения температуры для изоляции класса В в два раза (так называемое правило Монтзингера), хотя в первоисточнике приводятся 8° . По другим источникам это значение лежит в пределах $8^\circ \div 12^\circ$. Но это правило не гарантирует определенный срок службы изоляции.

Эта связь носит логарифмический характер. Износ изоляции при постоянной температуре ϑ определяется выражением:

$$\zeta = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{T_0} e^{-b\vartheta}, \quad (3.40)$$

а если температура изменяется в течение времени t то выражением:

$$\zeta = \frac{1}{T_0} \int_0^1 e^{-b\vartheta} dt. \quad (3.41)$$

Так как обычно интересует относительное уменьшение срока службы изоляции, то определяют не ζ , а $Z = \zeta \cdot T_0$. В соответствии с [55] общий износ изоляции за время пуска и охлаждения обмотки может быть определен как

$$Z = \frac{T^2 e^{b\vartheta}}{b \cdot \Delta\vartheta_H (k^2 - 1) t_n} \times \left[4e^{\frac{b \cdot \Delta\vartheta_H (k^2 - 1) t_n}{2T}} + e^{-\frac{b \cdot \Delta\vartheta_H (k^2 - 1) t_n}{2T}} \left(1 + \frac{t_n}{T} \right) - 5 - \frac{t_n}{T} \right], \quad (3.42)$$

где T – постоянная нагрева обмотки двигателя, с; ϑ_H – температура до которой произошел нагрев обмотки, если двигатель работал с номинальной нагрузкой; $\Delta\vartheta_H$ – превышение температуры обмотки над температурой окру-

жающей среды; $^{\circ}\text{C}$; $k = \frac{I}{I_H}$ – коэффициент кратности пускового тока; t_n – время пуска, с.

Для средних значений, если обмотки двигателя работают до перегрузки с номинальной нагрузкой, можно принять: температура охлаждающего воздуха 40°C , $\vartheta_H=155^{\circ}$, тогда $\Delta\vartheta_H = 115^{\circ}\text{C}$.

Постоянные нагрева обмоток статора и ротора соответственно составляют [18]:

$$T_c = \frac{150 \cdot \Delta\vartheta_H}{j_H^2}; \quad T_p = \frac{T_c}{2}, \quad (3.44)$$

где j_H – плотность тока в обмотке статора при номинальной нагрузке, А/мм.

Определим снижение срока службы изоляции АД эксгаустера 630 кВт за счет пусковых режимов, при условии, что пуск осуществляется 1 раз в смену и длительность его составляет 6,5с; кратность пускового тока $k=5,6$; постоянная нагрева обмотки $T_c = 150$ с.

Если принять, что величина общего износа изоляции за период нагревания и охлаждения обмоток двигателя $Z = 1,545 \cdot 10^7$, то дополнительный износ изоляции обмотки за год

$$Z_1 = 1545 \cdot 10^4 \cdot 365, \quad (3.45)$$

где 365 – число дней в году.

Износ изоляции при температуре обмотки $\vartheta_H = 95^{\circ}\text{C}$ в течение года

$$Z_2 = \zeta \cdot C = e^{0,088 \cdot 95} \cdot 360 \cdot 85035 = 1,308 \cdot 10^{11}, \quad (3.46)$$

где 85035 – количество секунд за минусом времени пуска $3t_n = 15$ с и времени охлаждения $3 \cdot 3 T_c = 1350$ с.

Срок службы изоляции с учетом перегрузки при пусках

$$\frac{1}{Z_1 + Z_2} = 5,3642 \cdot 10^{-12}. \quad (3.47)$$

Тогда, величина износа изоляции обмоток за год для идеальных условий, когда отсутствуют перегрузки для $\vartheta_H = 95^{\circ}\text{C}$:

$$Z_H = e^{0,088 \cdot 95} \cdot 360 \cdot 24 \cdot 3600 = 1,329 \cdot 10^{11}. \quad (3.48)$$

Срок службы изоляции при отсутствии перегрузок

$$\frac{1}{Z_H} = 7,525 \cdot 10^{-12}. \quad (3.49)$$

Снижение срока службы изоляции за счет пусков

$$\frac{1}{Z_H} - \frac{1}{Z_1+Z_2} = 2,1608 \cdot 10^{-12}. \quad (3.50)$$

Снижение срока службы изоляции составляет

$$\frac{\frac{1}{Z_H} - \frac{1}{Z_1+Z_2}}{\frac{1}{Z_H}} \cdot 100\% = 27,98\% \quad (3.51)$$

Чем больше число пусков, тем срок службы изоляции уменьшается в большей степени. Поэтому в большинстве случаев стремятся сократить число пусков двигателей, несмотря на увеличение расходов электроэнергии за счет работы вхолостую.

Определим влияние снижения кратности пускового тока на снижение срока службы изоляции, заметив, что при снижении кратности тока время пуска увеличивается, расчеты приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4- Снижение срока службы изоляции при снижении кратности пускового тока

<i>Характеристика</i>			
Кратность пускового тока	5,6	4	2
Длительность пуска, с	5	8	12
Снижение срока службы изоляции, %	28	21,2	9

Из таблицы видно, что снижая кратность пускового тока можно существенно увеличить срок службы изоляции, тем самым увеличивая межремонтные сроки и повышая ресурс двигателя. А снизить величину тока в переходных процессах, как известно из теории цепей, возможно введением дополнительной индуктивности. Таким образом, возникает задача разработки новых устройств и способов, ранее не используемых для пуска асинхронных двигателей, снижающих кратность пускового тока.

Как показано выше, наиболее нагретой частью асинхронного двигателя является лобовая часть статорной обмотки. Обмотки изготавливаются из ма-

териалов относящихся к классу нагревостойкости В, при этом ресурс изоляции составляет 20000 ч. при 120 °C [45].

В результате мониторинга и по расчетам по предложенной модели теплового состояния получены данные по максимальным температурам лобовой части статорной обмотки за время работы двигателя 800 часов (рисунок 3.18). После обработки данных ресурс двигателя составил 18700 ч. при 120 °C. На этом рисунке наглядно видно правило Монтзингера для изоляции класса В.

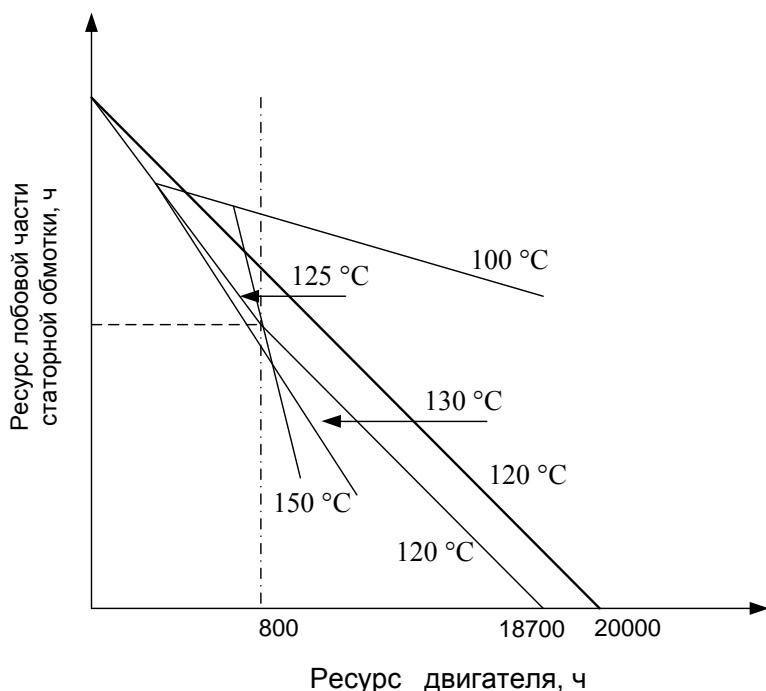


Рисунок 3.18. - Расчет ресурса двигателя по тепловому состоянию

Данный рисунок представляет стационарный процесс. По расчетам конечно-элементной тепловой модели АД находим наиболее нагретый узел и по его максимальной температуре делаем заключение о ресурсе. Наклон линии определяет ресурс. После этого рассчитывается наклон линии и определяется прогноз ресурса двигателя.

Необходимо отметить, что задача определения текущих максимальных значений температуры могла быть решена только после разработки конечно-элементной тепловой модели, которая является динамической. Таким образом, наличие тепловой математической модели позволит реализовать алгоритм прогнозирования ресурса асинхронных двигателей.

Выводы по главе 3

1. Было предложено для длительных процессов рассматривать асинхронную машину как трехмассовую. Первое тело представляет собой обмотки статора, второе – сталь статора и станина, третье – ротор. Такая модель с достаточной точностью описывает тепловое состояние как при длительных пусках (для механизмов с большим моментом инерции), так и в установившихся режимах работы.

2. Для решения задачи нагрева асинхронной машины при пуске, а именно пуске от трансформаторно-тиристорного пускового устройства, где время пуска превышает время прямого пуска 4-5 раз разработана конечно-элементная тепловая модель. Чтобы разработать конечно-элементную тепловую модель, машина была разбита на одиннадцать блоков. 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 для каждого блока также описаны в центральном узле блока, пренебрегая термическими способностями воздуха и изоляционных материалов.

3. Как показали расчеты наиболее нагретыми частями АД при пуске являются лобовые части, как статорной обмотки, так и кольцо ротора, температура достигает 117^0C , затем при работе с постоянной нагрузкой и длительном режиме работы температура этих частей снижается и не превышает средней температуры внутри двигателя 47^0C .

4. Снижая кратность пускового тока можно существенно увеличить срок службы изоляции, тем самым увеличивая межремонтные сроки и повышая ресурс двигателя. Разработанная тепловая модель позволяет с достаточной точностью рассчитать максимальные текущие температуры в разных

частях двигателя, определять температуру в недоступных для непосредственного измерения областей. Это позволит использовать тепловую модель при мониторинге асинхронного двигателя с целью прогнозирования ресурса.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА НОВЫХ СПОСОБОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ

4.1. Разработка каскадного способа пуска асинхронных двигателей

Широко известны и применяются способы пуска асинхронных двигателей с использованием дополнительных пусковых реостатов, реакторный пуск. Для ряда производств характерно наличие однотипных двигателей, установленных в непосредственной близости друг от друга. Это, например, вентиляторные станции, у которых количество однотипных двигателей колеблется от 2 до 8, а так же насосные станции водозаборов, эксгаустеры и другие. При этом одновременно все двигатели не используются. Нами предлагается использовать резервный или не участвующий в технологическом процессе двигатель в качестве пускового устройства. Дополнительной индуктивностью выступает статорная обмотка второго двигателя. Такой способ, назван нами - каскадный пуск.

При рассмотрении каскадного пуска следует различать следующие случаи:

- двигатели соединяют последовательно, один из которых используется как пусковое устройство. После разгона его отключают (пуск с использованием резервного двигателя). Механическая связь между валами двигателей отсутствует [130];

- двигатели соединяют последовательно, происходит разгон обоих двигателей. При достижении определенной скорости электрические цепи двигателей размыкают и включают каждый на полное напряжение сети. Механическая связь между валами двигателей отсутствует;

- двигатели соединяют последовательно, происходит разгон обоих двигателей. При достижении определенной скорости электрические цепи двигателей размыкают и включают каждый на полное напряжение сети. Существует механическая связь между валами двигателей [115].

Возникает задача, определения возможности применения этого способа пуска для асинхронных двигателей. Для этого необходимо разработать математическую модель каскадного соединения двигателей и проверить ее на физической модели.

4.2. Математическая модель асинхронного двигателя при каскадном пуске

4.1.1. Требования к модели каскадного пуска

На основании поставленной задачи снижения кратности пускового тока при каскадном включении асинхронных двигателей, сформулируем требования, предъявляемые к создаваемой для этого способа математической модели. Рассмотрим двухдвигательную систему, структурная схема, которой представлена рисунок 4.1.

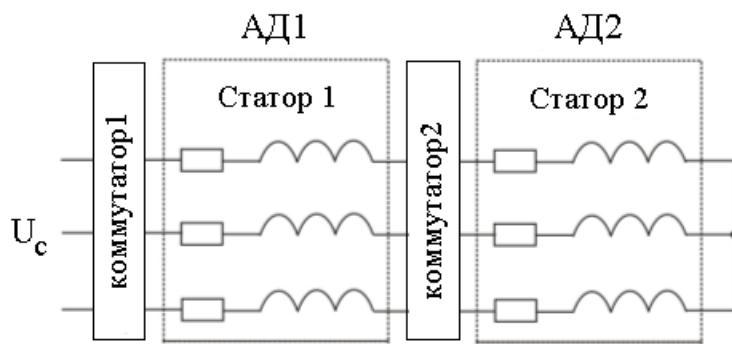


Рисунок 4.1. - Структура статорных цепей двухдвигательной системы

Способ пуска трехфазного высоковольтного электродвигателя переменного тока осуществляют в следующей последовательности [130]:

- статорные обмотки электродвигателей соединяют попарно-последовательно;
- на время пуска ротор резервного электродвигателя затормаживают путем наложения механического тормоза;
- затем на вход полученного соединения подают номинальное напряжение, причем напряжение, приходящееся на статорные обмотки каждого

электродвигателя, распределяется пропорционально сопротивлению их обмоток;

- пускаемый электродвигатель разгоняют;
- отключают резервный электродвигатель;
- статорную обмотку пускаемого электродвигателя соединяют по схеме «общая звезда» или «общий треугольник»;
- пускаемый электродвигатель разгоняют до рабочей скорости вращения.

Разрабатываемая математическая модель должна описывать процесс разгона двигателя от начальной скорости, которая может быть и не нулевой до достижения установившегося режима с учетом коммутации. Модель позволит провести следующие исследования: типовые режимы пуска и неисследованные ранее режимы, такие как:

- каскадный пуск двухдвигательной системы;
- пуск двигателя с вентиляторной нагрузкой;
- исследования каскадного пуска двигателей, которые отличаются своими параметрами и характеристиками.

Такие исследования необходимы для определения адекватности модели системы и для условий реализуемости каскадного пуска.

Математическая модель должна учитывать все коммутационные процессы, происходящие в двигателе. При этом есть существенные особенности, отличающие её от известных моделей. Например, происходит отключение статора одного двигателя от другого, при этом напряжение на одном увеличивается (для двигателя с вращающимся ротором), а на другом происходит отключение от сети. Условия дальнейшего развития процесса в двигателях будут отличаться, так как происходит «разрыв» тока и дальнейший разбег пускаемого двигателя. Бестоковая пауза, обусловленная длительностью срабатывания коммутационной аппаратуры, при этом не будет учитываться.

Необходимым условием при разработке модели является адекватность процессов происходящих в машине и рассчитанных на модели. В реальном

двигателе, поверхности ротора и статора машины имеет сложную геометрию, и не учитывать может привести к искажениям реальной картины магнитного поля. А значит, форма и величины токов статора и характеристики двигателя не будут соответствовать реальным. Поэтому необходимо рассмотреть вопрос о возможности каскадного пуска двигателей, различающихся как по мощности, так и конструктивно. Рассмотрим известные методы моделирования асинхронных двигателей.

4.1.2. Анализ методов моделирования асинхронных двигателей

Большинство методов моделирования электрических машин основывается на общих уравнениях электромагнетизма и электротехники - это, прежде всего, уравнения Максвелла в электротехническом приложении и уравнения Кирхгофа. Для того чтобы получить максимально простое описание, необходимо вводить упрощения и допущения как для граничных условий, так и для возможных физических процессов, что позволяет выбирать решения с использованием разложения в ряды Фурье. Таким образом, сразу же можно говорить о том, что модель имеет заранее оговоренные ограничения и адекватно отражает процессы на определенном уровне задания доверительного интервала.

Рассмотрим стандартные допущения, описанные Р.Т.Шрейнером [158], позволяющие упростить математическое описание электропривода. Анализ их позволит определить за счет чего происходит потеря адекватности описания электрической машины. Все допущения можно объединить по упрощениям связанных с геометрией машины, магнитных свойств материалов. Допущения, связанные с геометрией электрической машины чаще всего встречаются, такими являются [97, 158]:

- равномерный воздушный зазор;
- отсутствующие пазы и явно выраженные полюсы;
- катушечные стороны имеют вид тонкой ленты;

- радиус статора и полюсные деления τ намного превышают воздушный зазор δ ;
- прямоугольником представляется пространственный контур витка.

Исходя из этих допущений геометрия электрической машины упрощена на стадии выбора уравнений математического описания машины. При этом, уже на этом этапе нет возможности моделировать как сложные варианты геометрии обмоток, так и возможность рассмотрения дефектов связанных с геометрией у машины и обмоток.

Наряду с описанными выше упрощениями принимаются допущения о том, как распределено магнитное поле в машине, магнитных свойствах материалов статора и ротора и обмоток, т.е. такими, как описаны в [158]:

- магнитная проницаемость стали сердечников $\mu_c = \infty$;
- магнитное поле в объеме машины является плоскопараллельным, т.е. в поперечном сечении двигателя картина поля постоянна;
- потери в стали не учитываются;
- витки прямолинейны и перпендикулярны поверхности, ограниченной пространственным контуром, образуют линии магнитной индукции потока в зоне контура;
- насыщение путей рассеяния не учитывается, как и влияние потоков рассеяния и главного магнитного потока друг на друга.

Как показано в [96], величина пазов учитывается посредством коэффициентов или вообще не учитывается. Магнитный поток рассеяния учитывается, исходя не из магнитных свойств материалов и геометрии сердечника, а при помощи коэффициентов[158]. Получается, что эти допущения о магнитной системе изначально для объектов имеет заданный процент адекватности.

Асинхронные двигатели представляют совокупностью сложных трехмерных электрических и магнитных цепей, имеющих участки с различной магнитной проницаемостью. При этом описание реального двигателя с помощью уравнений Maxwella заведомо имеет ошибку. Для исследования и при инженерных расчетах используют упрощенные представления о процес-

сах в асинхронной машине, в некоторых случаях не рассматривают влияние изменяющегося насыщения магнитной цепи, эффекта вытеснения тока в стержнях ротора, потерь в стали статора, несинусоидальности токов и других параметров. Такие модели описывают электромагнитные процессы в двигателе и вычисление его координат с точностью достаточной для практических целей [163].

Большое количество трудов посвящено разработке математических моделей асинхронных двигателей и оценки адекватности [17, 35, 52, 66, 67, 69, 71, 96, 97, 106, 109, 123, 141, 153, 154, 163]. Большой вклад в теорию асинхронных машин, переходных процессов и их исследованию внесли Ключев В.И. [65], Петров Л.П. [106, 109], Копылов И.П. [68-71], Ковач К.П. и Рац И. [67], Шрейнер Р.Т. [15] и другие авторы.

Если напряжение на обмотках трехфазной симметричной асинхронной машины синусоидальны, то машину можно представить в виде эквивалентной двухфазной[153]. При питании от преобразователей частоты или при применении пусковых устройств напряжение несинусоидальное и электромагнитные процессы, происходящие в машине, имеют прерывистый характер. В этом случае приводить машину к двухфазной нельзя, из-за того что поле в зазоре двухфазной машины отличается от трехфазной машины[123]. В этом случае, математическая модель состоит из системы дифференциальных уравнений в трехфазных координатных осях «*a, b, c*», описывающих фазные координаты статора и преобразованных координат ротора [68, 120].

При построении модели асинхронного двигателя принимаем следующие общепринятые положения:

- обмотки машины симметричны, сдвинуты относительно друг друга на 120° как в статоре, так и в роторе;
- поле машины плоскопараллельно;
- воздушный зазор равномерен;
- эксцентриситетов статора и поверхности ротора нет или они незначительны;

– потери в стали не учитываем.

Система дифференциальных уравнений трехфазной машины с коротко-замкнутым ротором имеет вид [120]:

$$\left. \begin{array}{l} u_{sa} = R_{sa} \cdot i_{sa} + \frac{d\psi_{sa}}{dt}; \\ u_{sb} = R_{sb} \cdot i_{sb} + \frac{d\psi_{sb}}{dt}; \\ u_{sc} = R_{sc} \cdot i_{sc} + \frac{d\psi_{sc}}{dt}; \\ 0 = R_{ra} \cdot i_{ra} + \frac{d\psi_{ra}}{dt}; \\ 0 = R_{rb} \cdot i_{rb} + \frac{d\psi_{rb}}{dt}; \\ 0 = R_{rc} \cdot i_{rc} + \frac{d\psi_{rc}}{dt}, \end{array} \right\} \quad (4.1)$$

где u_{sj} – фазные напряжения обмотки статорной обмотки ($j = a, b, c$);

i_{sj} , i_{rj} – ток статорной и роторной обмоток;

R_{sj} , R_{rj} – их активные сопротивления;

ψ_{sj} , ψ_{rj} – их потокосцепления.

Потокосцепления в (4.1) можно выразить как:

$$\left. \begin{array}{l} \psi_{sa} = L_{sa}i_{sa} + L_{sab}i_{sb} + L_{sac}i_{sc} + L_{sara}i_{ra} + L_{sarb}i_{rb} + L_{sarc}i_{rc}; \\ \psi_{sb} = L_{sba}i_{sa} + L_{sb}i_{sb} + L_{sbc}i_{sc} + L_{sbra}i_{ra} + L_{sbrb}i_{rb} + L_{sbrc}i_{rc}; \\ \psi_{sc} = L_{sca}i_{sa} + L_{scb}i_{sb} + L_{sc}i_{sc} + L_{scra}i_{ra} + L_{scrb}i_{rb} + L_{scrc}i_{rc}; \\ \psi_{ra} = L_{rasa}i_{sa} + L_{rasb}i_{sb} + L_{rasc}i_{sc} + L_{ra}i_{ra} + L_{rab}i_{rb} + L_{rac}i_{rc}; \\ \psi_{rb} = L_{rbsa}i_{sa} + L_{rbsb}i_{sb} + L_{rbsc}i_{sc} + L_{rba}i_{ra} + L_{rb}i_{rb} + L_{rbc}i_{rc}; \\ \psi_{rc} = L_{rcsa}i_{sa} + L_{rcsb}i_{sb} + L_{rcsc}i_{sc} + L_{rca}i_{ra} + L_{rcb}i_{rb} + L_{rc}i_{rc}, \end{array} \right\} \quad (4.2)$$

где L_{sj} , L_{rj} – собственная индуктивность обмотки статора и ротора;

L_{sjj} – взаимная индуктивность в обмотках статора;

L_{rjj} – взаимная индуктивность в обмотках ротора;

L_{sjrj} , L_{rjsj} – обмотки статора и ротора имеют взаимную индуктивность.

В виду того что, обмотки статора и ротора машины выполняются симметричными, их активные сопротивления равны между собой:

$$\left. \begin{array}{l} R_{sa} = R_{sb} = R_{sc} = R_s; \\ R_{ra} = R_{rb} = R_{rc} = R_r, \end{array} \right\} \quad (4.3)$$

Так как мы приняли, что воздушный зазор между ротором и статором равномерен, то все собственные индуктивности в (4.2) не зависят от положения ротора и определяются как:

$$\left. \begin{array}{l} L_{sa} = L_{sb} = L_{sc} = L_s = l_s + L_m; \\ L_{ra} = L_{rb} = L_{rc} = L_r = l_r + L_m, \end{array} \right\} \quad (4.4)$$

где l_s , l_r – индуктивность рассеяния обмотки статора и ротора;

L_m – взаимная индуктивность.

Геометрически обмотки статора смещены в пространстве на угол 120° , тогда запишем:

$$\left. \begin{array}{l} L_{sab} = L_{sba} = L_m \cdot \cos 2\pi/3 = -0,5L_m; \\ L_{sac} = L_{sca} = L_m \cdot \cos 4\pi/3 = -0,5L_m; \\ L_{sbc} = L_{scb} = L_m \cdot \cos 2\pi/3 = -0,5L_m. \end{array} \right\} \quad (4.5)$$

Для взаимных индуктивностей цепи ротора аналогичные (4.5) можно записать выражения.

Значения взаимных индуктивностей между обмотками статора и ротора определяются, согласно рисунка 4.2:

$$\left. \begin{array}{l} L_{sara} = L_{rasha} = L_{sbrb} = L_{rbsh} = L_{scrc} = L_{rcsc} = L_m \cdot \cos \theta; \\ L_{sarb} = L_{rbsa} = L_{sbrc} = L_{rcsb} = L_{scra} = L_{rasc} = L_m \cdot \cos(\theta + 2\pi/3); \\ L_{sarc} = L_{rcsa} = L_{sbra} = L_{rasb} = L_{scrh} = L_{rbsh} = L_m \cdot \cos(\theta + 4\pi/3). \end{array} \right\} \quad (4.6)$$

где $\theta = d\omega/dt$ – электрический угол поворота ротора.

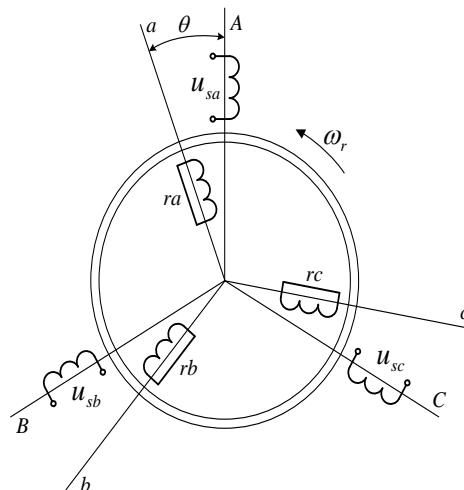


Рисунок 4.2. - Модель трехфазной машины с короткозамкнутым ротором

Подставляя выражения (4.2) в (4.1) с учетом (4.3)-(4.6), то в результате получаем уравнения, содержащие более десятка термов и имеющие переменные коэффициенты. Для исключения переменных коэффициентов, необходимо перейти от вращающейся системы координат к неподвижной. Такая система получается проецированием результирующих векторов мгновенных значений токов и потокосцеплений ротора на оси A, B, C статора. Получаем матрицу преобразований для трехфазной системы в осях статора, которая имеет вид [120]:

$$\mathbf{M} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2/3\cos\theta & 2/3\cos(\theta + 2\pi/3) & 2/3\cos(\theta - 2\pi/3) \\ 0 & 0 & 0 & 2/3\cos(\theta - 2\pi/3) & 2/3\cos\theta & 2/3\cos(\theta + 2\pi/3) \\ 0 & 0 & 0 & 2/3\cos(\theta + 2\pi/3) & 2/3\cos(\theta - 2\pi/3) & 2/3\cos\theta \end{vmatrix}. \quad (4.7)$$

Применяя выражение (4.7) после преобразований, показанных в [50], и с учетом (4.3) уравнения (4.1) для трехфазной системы координат приобретают следующий вид:

$$\left. \begin{array}{l} u_{sa} = R_s \cdot i_{sa} + \frac{d\psi_{sa}}{dt}; \\ u_{sb} = R_s \cdot i_{sb} + \frac{d\psi_{sb}}{dt}; \\ u_{sc} = R_s \cdot i_{sc} + \frac{d\psi_{sc}}{dt}; \end{array} \right\} (4.8,a) \quad \left. \begin{array}{l} -R_r \cdot i_{ras} = \frac{d\psi_{ras}}{dt} + \frac{(\psi_{rbs} - \psi_{rcs})}{\sqrt{3}} \omega_r; \\ -R_r \cdot i_{rbs} = \frac{d\psi_{rbs}}{dt} + \frac{(\psi_{rcs} - \psi_{ras})}{\sqrt{3}} \omega_r; \\ -R_r \cdot i_{rcs} = \frac{d\psi_{rcs}}{dt} + \frac{(\psi_{ras} - \psi_{rbs})}{\sqrt{3}} \omega_r. \end{array} \right\} (4.8,b)$$

где i_{rjs} , ψ_{rjs} – токи и потокосцепления обмоток ротора в неподвижной системе координат;

$$\omega_r = \omega \cdot p;$$

ω – частота вращения ротора;

p – число пар полюсов машины.

Потокосцепления (4.2) с учетом (4.4)-(4.6) определяются как:

$$\left. \begin{array}{l} \psi_{sa} = L_s \cdot i_{sa} + L_m \cdot i_{ras}; \\ \psi_{sb} = L_s \cdot i_{sb} + L_m \cdot i_{rbs}; \\ \psi_{sc} = L_s \cdot i_{sc} + L_m \cdot i_{rcs}; \end{array} \right. \quad \left. \begin{array}{l} \psi_{ras} = L_r \cdot i_{ras} + L_m \cdot i_{sa}; \\ \psi_{rbs} = L_r \cdot i_{rbs} + L_m \cdot i_{sb}; \\ \psi_{rcs} = L_r \cdot i_{rcs} + L_m \cdot i_{sc}. \end{array} \right\} (4.9)$$

Электромагнитный момент машины в неподвижной системе координат можно определить как [68]:

$$M = \frac{p \cdot L_m}{\sqrt{3}} \cdot [i_{sa} \cdot (\psi_{rcs} - \psi_{rbs}) + i_{sb} \cdot (\psi_{ras} - \psi_{rcs}) + i_{sc} \cdot (\psi_{rbs} - \psi_{ras})]. \quad (4.10)$$

Обратное преобразование к реальным токам ротора осуществляется согласно (4.7) выражениям:

$$\left. \begin{aligned} i_{ra} &= \frac{2}{3} [i_{ras} \cdot \cos \theta + i_{rbs} \cdot \cos(\theta + 2\pi/3) + i_{rcs} \cdot \cos(\theta - 2\pi/3)]; \\ i_{rb} &= \frac{2}{3} [i_{rbs} \cdot \cos \theta + i_{rcs} \cdot \cos(\theta + 2\pi/3) + i_{ras} \cdot \cos(\theta - 2\pi/3)]; \\ i_{rc} &= \frac{2}{3} [i_{rcs} \cdot \cos \theta + i_{ras} \cdot \cos(\theta + 2\pi/3) + i_{rbs} \cdot \cos(\theta - 2\pi/3)]; \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

Значения потокосцепления ротора определяются по выражениям аналогичным (4.11).

4.2.1. Учет магнитного состояния машины

Магнитное состояние асинхронного двигателя, как правило, в номинальных режимах определяется как расположение на участке кривой намагничивания близкой к нелинейному участку. В этой связи в динамических режимах следует учитывать изменение величин индуктивностей. Так как поля индуктивностей рассеяния статора и ротора замыкаются по воздуху, величины индуктивностей рассеяния не зависят от насыщения машины. Поэтому можно говорить о том, что насыщение машины влияет только на взаимную индуктивность L_m .

Наиболее часто используется способ учета насыщения магнитной цепи машины - определение значения взаимной индуктивности по кривой намагничивания (зависимость потокосцепления ψ_m от тока намагничивания i_m). Известны аналитические представления этой кривой и среди их разнообразия, рассмотренных в литературе [52, 68, 158, 163], наиболее характерна формула [69]:

$$\psi_m(i_m) = \psi_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{i_m}{i_1}} \right) + k \cdot i_m, \quad (4.12)$$

где все определяется из кривой намагничивания.

А величина результирующего тока намагничивания машины определяется из выражения:

$$i_m = \sqrt{\frac{i_{ma}^2 + i_{mb}^2 + i_{mc}^2}{3}}, \quad (4.13)$$

где ток намагничивания каждой из фаз определяется током статора и ротора

$$i_{mj} = i_{sj} + i_{rjs}. \quad (4.14)$$

Значение взаимной индуктивности вычисляется по величине тока намагничивания и заданной аналитически кривой намагничивания, согласно выражению:

$$L_m = \frac{\psi_m(i_m)}{i_m}. \quad (4.15)$$

Как правило, учет насыщения магнитной цепи машины приводит к существенному усложнению всей модели. В конкретных задачах исследований требуется оценка необходимости учитывать или нет состояние цепи намагничивания асинхронного двигателя.

4.2.2. Исследование влияния вытеснения тока в пазах ротора на пуск

При увеличении скольжения происходит увеличение частоты тока в стержнях обмоток ротора, проявляется эффект вытеснения тока, который изменяет плотность тока. Плотность тока в нижней части стержней уменьшается, а в верхней увеличивается. При этом происходит увеличение активного сопротивления ротора и уменьшение индуктивного.

Исследования на математических моделях асинхронных двигателей подтверждают положение, что существенное влияние оказывает на динамику асинхронных двигателей нелинейность изменения сопротивлений ротора [17, 52, 120]. Учет явления эффекта вытеснения тока в пазах короткозамкнутого ротора дает увеличение начального момента двигателя, уменьшение времени пуска и снижение пусковых токов.

Задачу эффекта вытеснения тока одним из первых рассмотрел Ф. Эмде. Он показал, что ток вытесняется в тех частях обмотки ротора, которые расположены в пазу. Это явление не распространяется на те части обмотки, ко-

торые расположенные выше паза. В [68] показано, что 30 % обмотки расположено вне паза. Тогда значения активного сопротивления обмотки ротора и индуктивности рассеяния определяются как:

$$\left. \begin{aligned} R_r &= R_{r0}(0,3 + 0,7 \cdot k_r); \\ l_r &= l_{r0}(0,3 + 0,7 \cdot k_x), \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

где R_{r0} , l_{r0} – активное сопротивление и индуктивность рассеяния ротора соответственно при скольжении равном 0 ($s=0$);

k_r , k_x – коэффициенты, которые учитывают изменение этих величин из-за вытеснения тока.

Выражения, которые определяют k_r , k_x описываются выражениями [123, 143]:

$$\left. \begin{aligned} k_r &= \xi \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi}; \\ k_x &= \frac{3 \cdot \sinh 2\xi - \sin 2\xi}{2\xi \cdot \cosh 2\xi - \cos 2\xi}, \end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$

где ξ – приведенная высота стержня ротора.

Если двигатель имеет литую алюминиевую обмотку ротора и номинальную температуру 75°C получаем, что значение приведенной высоты стержня ротора:

$$\xi = 65,15 \cdot h_c \sqrt{s}, \quad (4.18)$$

где h_c – геометрическое значение высоты стержня в пазу.

Проведя анализ зависимостей (4.16-4.18) получим, что при значении $\xi \leq 1$ эффект вытеснения тока незначительно влияет на сопротивление и индуктивность стержней ротора [123]. При величинах больше единицы его необходимо учитывать при моделировании.

4.2.3. Основные уравнения асинхронного двигателя

Для моделирования уравнения (4.8) необходимо представить в виде нормальной формы Коши:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{d\psi_{sa}}{dt} = u_{sa} - R_s \cdot i_{sa}; \\ \frac{d\psi_{sb}}{dt} = u_{sb} - R_s \cdot i_{sb}; \\ \frac{d\psi_{sc}}{dt} = u_{sc} - R_s \cdot i_{sc} \\ \frac{d\psi_{ras}}{dt} = -R_r \cdot i_{ras} - \frac{(\psi_{rbs} - \psi_{rcs})}{\sqrt{3}} \omega_r; \\ \frac{d\psi_{rbs}}{dt} = -R_r \cdot i_{rbs} - \frac{(\psi_{rcs} - \psi_{ras})}{\sqrt{3}} \omega_r; \\ \frac{d\psi_{rcs}}{dt} = -R_r \cdot i_{rcs} - \frac{(\psi_{ras} - \psi_{rbs})}{\sqrt{3}} \omega_r. \end{array} \right\} \quad (4.19)$$

При этом выражения (4.9) с учетом (4.4) и (4.14) представляются отдельно для токов статора и токов ротора:

$$\left. \begin{array}{l} i_{sa} = \frac{\psi_{sa} - L_m \cdot i_{ma}}{l_s}; \\ i_{sb} = \frac{\psi_{sb} - L_m \cdot i_{mb}}{l_s}; \\ i_{sc} = \frac{\psi_{sc} - L_m \cdot i_{mc}}{l_s}; \\ i_{ras} = \frac{\psi_{ras} - L_m \cdot i_{ma}}{l_r}; \\ i_{rbs} = \frac{\psi_{rbs} - L_m \cdot i_{mb}}{l_r}; \\ i_{rcs} = \frac{\psi_{rcs} - L_m \cdot i_{mc}}{l_r}. \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} (4.20,a) \\ (4.20,b) \end{array}$$

Электромагнитный момент двигателя определяем из выражения (4.10) записывая его через токи статора и потокосцепления каждой из фаз:

$$M = \frac{P}{\sqrt{3}} \cdot [i_{sa} \cdot (\psi_{mc} - \psi_{mb}) + i_{sb} \cdot (\psi_{ma} - \psi_{mc}) + i_{sc} \cdot (\psi_{mb} - \psi_{ma})]. \quad (4.21)$$

К этим выражениям необходимо добавить основное уравнение движения [35]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad (4.22)$$

где J – суммарный момент инерции двигателя и механизма.

Математическая модель, разработанная для короткозамкнутого асинхронного двигателя, выполнена в программе *Matlab*, в его инженерном приложении *Simulink* [23, 68, 167]. Структурная схема модели, разработанной и построенной по выражениям (4.12)-(4.22) приведена на рисунке 4.3 [131]. Вычисление величины взаимной индуктивности L_m происходит в блоке (1) по выражениям (4.12) и (4.15). Наличие эффекта вытеснения тока в стрежнях ротора учитывается в блоке (2), где вычисляется расчет значений R_r , l_r по формулам (4.16)-(4.18). Сигналы напряжения статора u_{sj} и момента сопротивления нагрузки M_c являются входными для модели, а выходные – величины электромагнитного момента M , угловой скорости двигателя ω , и ток

статора i_{sj} . Из-за такого построения выходными сигналами, также могут быть и другие координаты двигателя (токи и потокосцепления цепей статора, ротора и цепей намагничивания). Мы получили открытую архитектуру, на основании которой можно построить модель каскадного включения асинхронных двигателей.

4.2.4. Разработка модели каскадного двухдвигательного электропривода

При разработке математической модели каскадного двухдвигательного электропривода, представленного на (рисунок 4.1) необходимо составить дифференциальные уравнения, связывающие напряжения на статорных обмотках двух двигателей. Система выражений для статорных обмоток принимает следующий вид:

$$\left. \begin{array}{l} u_{sa} = u_{sal} + u_{sa2}; \\ u_{sb} = u_{sbl} + u_{sb2}; \\ u_{sc} = u_{sc1} + u_{sc2}, \end{array} \right\} \quad (4.23)$$

где u_{sj1} , u_{sj2} – напряжения на обмотках двигателей.

Система дифференциальных уравнений (4.8,а) с учетом (4.23) при последовательном соединении обмоток статора представляется следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} u_{sa} = i_{sa} \cdot (R_{s1} + R_{s2}) + \frac{d\psi_{sal}}{dt} + \frac{d\psi_{sa2}}{dt}; \\ u_{sb} = i_{sb} \cdot (R_{s1} + R_{s2}) + \frac{d\psi_{sbl}}{dt} + \frac{d\psi_{sb2}}{dt}; \\ u_{sc} = i_{sc} \cdot (R_{s1} + R_{s2}) + \frac{d\psi_{sc1}}{dt} + \frac{d\psi_{sc2}}{dt}. \end{array} \right\} \quad (4.24)$$

Выражения (4.20,а) также изменятся и принимают вид:

$$\left. \begin{array}{l} i_{sa} = \frac{\psi_{sal} - L_{m1}i_{mal}}{l_{s1}} = \frac{\psi_{sa2} - L_{m2}i_{ma2}}{l_{s2}} = \frac{\psi_{sal} + \psi_{sa2} - L_{m1}i_{mal} - L_{m2}i_{ma2}}{l_{s1} + l_{s2}}; \\ i_{sb} = \frac{\psi_{sbl} - L_{m1}i_{mb1}}{l_{s1}} = \frac{\psi_{sb2} - L_{m2}i_{mb2}}{l_{s2}} = \frac{\psi_{sbl} + \psi_{sb2} - L_{m1}i_{mb1} - L_{m2}i_{mb2}}{l_{s1} + l_{s2}}; \\ i_{sc} = \frac{\psi_{sc1} - L_{m1}i_{mc1}}{l_{s1}} = \frac{\psi_{sc2} - L_{m2}i_{mc2}}{l_{s2}} = \frac{\psi_{sc1} + \psi_{sc2} - L_{m1}i_{mc1} - L_{m2}i_{mc2}}{l_{s1} + l_{s2}}. \end{array} \right\} \quad (4.25)$$

Уравнения электромагнитных цепей роторов (4.8,б) и (4.20,б) не изменяются для последовательно соединенных обмоток статора и их можно не приводить.

А электромагнитный момент, который развивает каждый из двигателей, определяется по выражению (4.21).

При разработке модели мы должны иметь возможность исследовать различные варианты каскадного включения:

- механическая связь в системе есть, тогда оба двигателя вращаются с одинаковой скоростью, а именно:

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega. \quad (4.26)$$

- механическая связь отсутствует, каждый из двигателей вращается со своей скоростью ω_1 и ω_2 .

В первом случае валы двигателей механически связаны и значит, вращаются в одном направлении, при этом уравнение движения электропривода имеет следующий вид:

$$\frac{d\omega}{dt}(J_1 + J_2) = M_1 + M_2 - M_c. \quad (4.27)$$

Во втором случае - $\frac{d\omega_i}{dt}J_i = M_i - M_{ci}$, при этом момент статический второго двигателя равен бесконечности, т.к. он заторможен.

Как и для модели одного асинхронного двигателя, выражения (4.24) приводятся в вид нормальной формы Коши:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{sa1}}{dt} + \frac{d\psi_{sa2}}{dt} &= \frac{d(\psi_{sa1} + \psi_{sa2})}{dt} = u_{sa} - i_{sa} \cdot (R_{s1} + R_{s2}); \\ \frac{d\psi_{sb1}}{dt} + \frac{d\psi_{sb2}}{dt} &= \frac{d(\psi_{sb1} + \psi_{sb2})}{dt} = u_{sb} - i_{sb} \cdot (R_{s1} + R_{s2}); \\ \frac{d\psi_{sc1}}{dt} + \frac{d\psi_{sc2}}{dt} &= \frac{d(\psi_{sc1} + \psi_{sc2})}{dt} = u_{sc} - i_{sc} \cdot (R_{s1} + R_{s2}). \end{aligned} \right\} \quad (4.28)$$

На рисунке 4.4 представлена структурная схема каскадного включения асинхронных двигателей, построенная по выражениям (4.12)-(4.18), (4.24)-(4.28) [92].

Для проведения моделирования каскадного включения асинхронных двигателей, определяем параметры схемы замещения (R_s , R_r , l_s , l_r , L_m). В

качестве исследуемых были выбраны асинхронные двигатели с номинальной мощностью 90 кВт типа 5АМН250S4. Параметры схемы замещения для него рассчитывались по методике, представленной в [132], которая здесь не приводится. Параметры схемы замещения показаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1- Параметры схемы замещения двигателя 5АМН250S4

R_s , Ом	R_r , Ом	l_s , мГн	l_r , мГн	L_m , мГн
0,037	0,0146	0,427	0,507	18,8

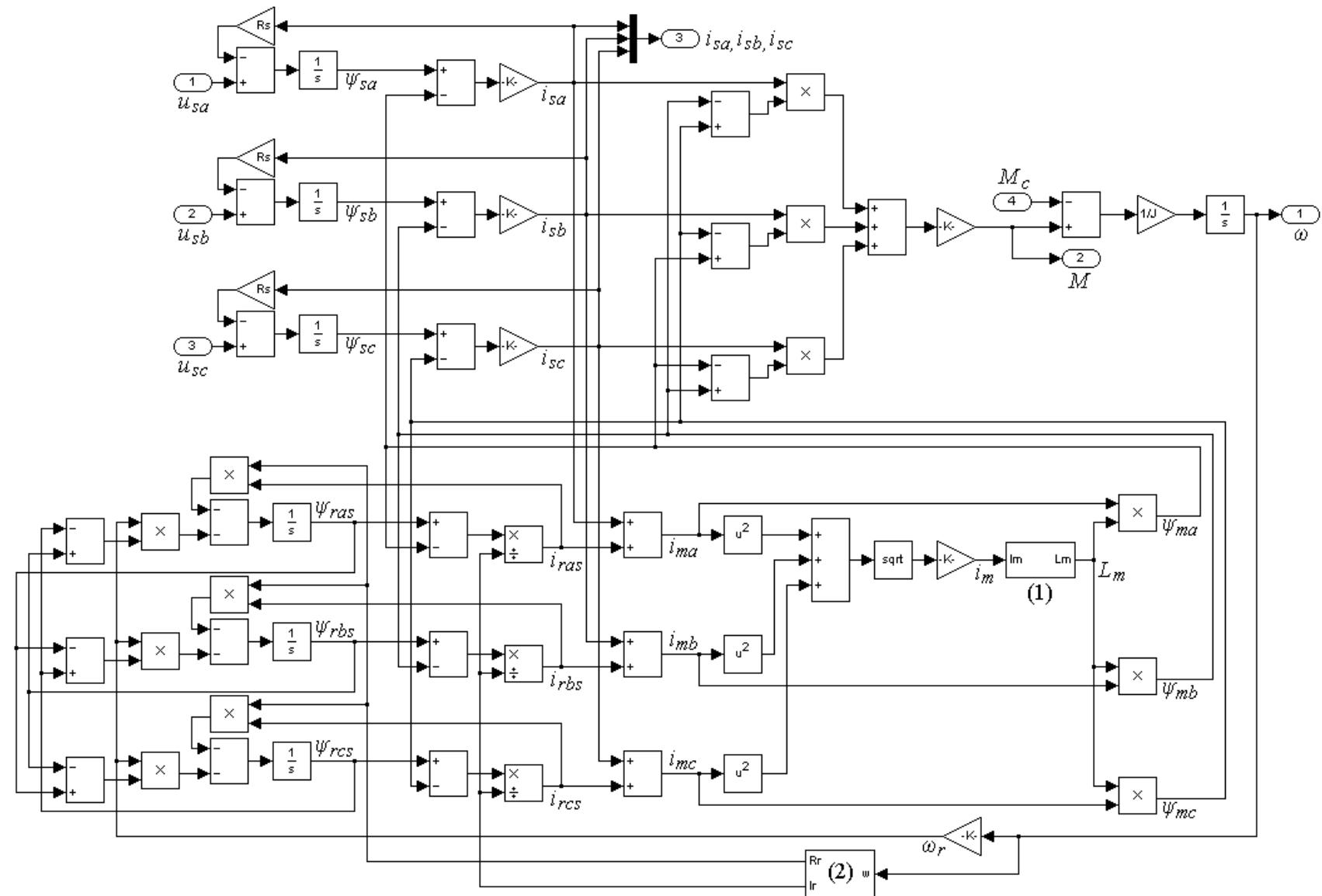


Рисунок 4.3. - Структурная схема открытой модели асинхронного двигателя

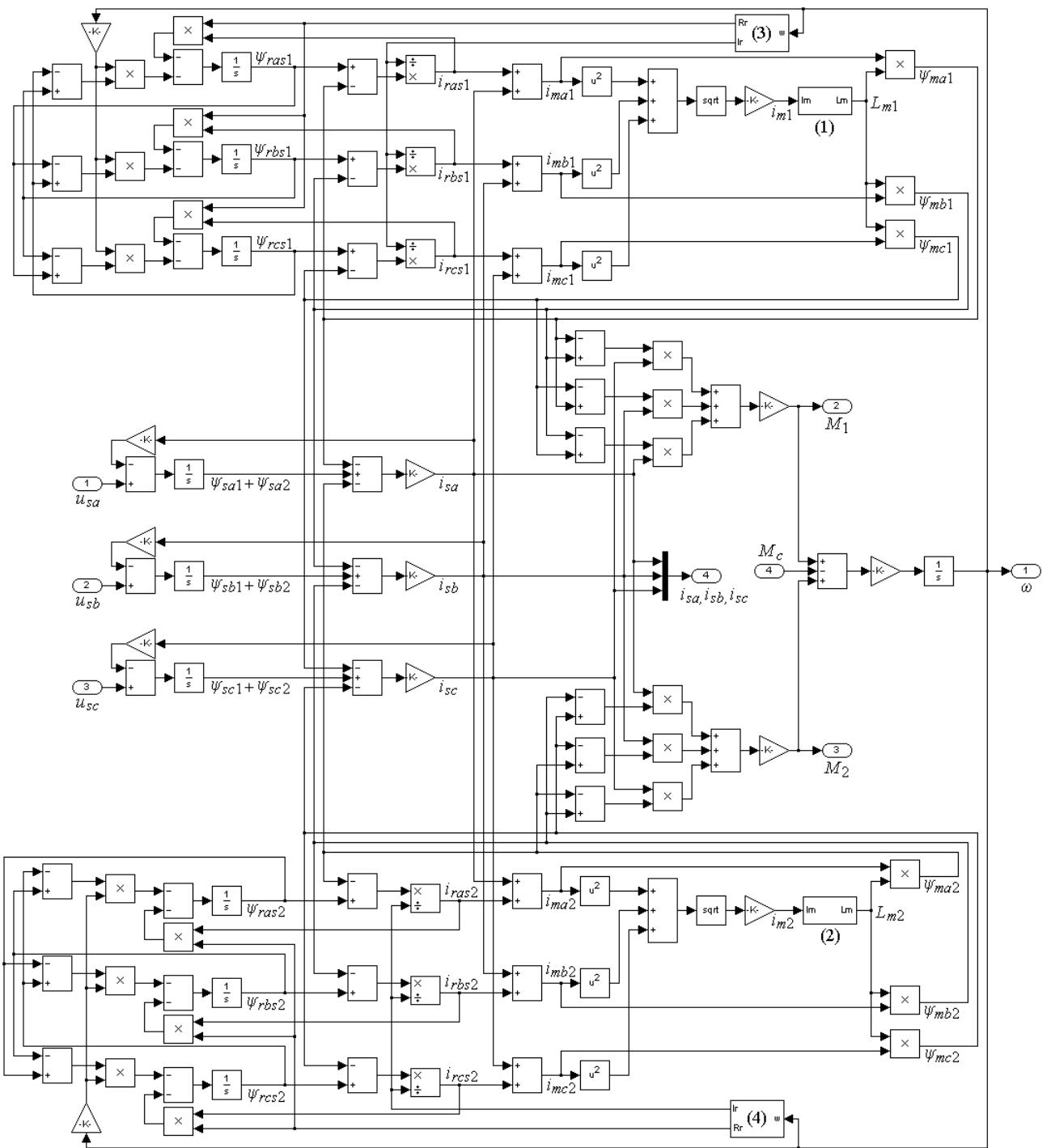


Рисунок 4.4. - Структурная схема математической модели
каскадного включения АД

4.3. Моделирование каскадного способа пуска и их анализ

Проводимые исследования необходимы для определения практического применения и особенностей при каскадном пуске асинхронных двигателей. Будут определены возможности реализации каскадного пуска в различных условиях, таких как - параметры двигателей отличаются друг от друга,

технические параметры двигателей различны, у двигателей различная нагрузка и т.д.

4.3.1. Оценка эффективности реализации каскадного пуска

При каскадном пуске, как предполагается, происходит снижение кратности пускового тока. При этом происходит снижение напряжения питания вдвое, что приводит к изменению пусковых характеристик асинхронного двигателя. Для сравнения рассмотрим пуск одного двигателя с пуском двух

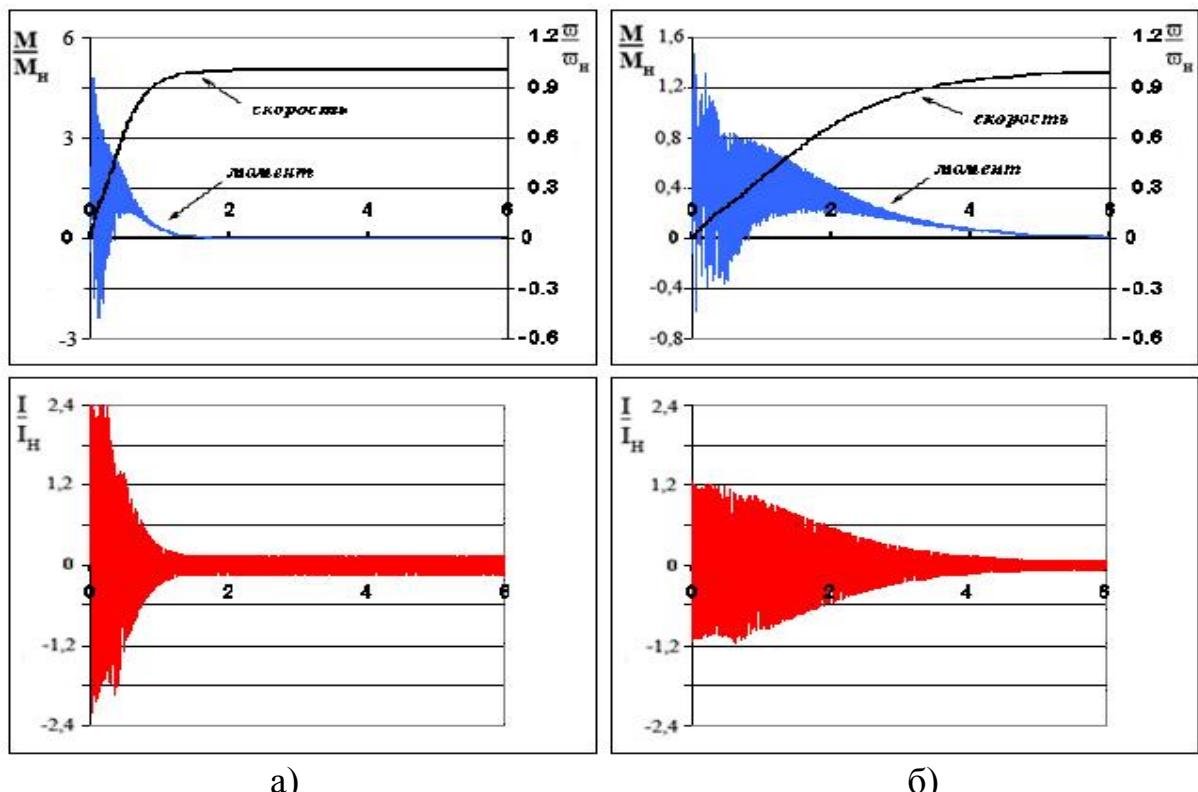


Рисунок 4.5. - Расчетные пусковые характеристики одного двигателя (а) и при каскадном включении (б)

двигателей статорные обмотки которых соединены последовательно. Построенные на основании моделирования расчетные кривые скорости, момента и тока при прямом пуске электродвигателя и каскадного пуска двух двигателей приведены на рисунке 4.5.

По графикам рисунка 4.5 видно, что в 2 раза снижается кратность пусковых токов при каскадном пуске, но при этом время пуска увеличивается в 3-4 раза. Снижение пусковых токов объясняется снижением прикладываемо-

го напряжения к каждому из двигателей в два раза, при условии, что двигатели имеют одинаковые технические характеристики.

4.3.2. Исследование способа перехода от каскадного включения на напряжение сети

Для перевода двигателей из каскадного включения в режимы работы, которые соответствуют 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. В том и другом случае, все переключения связаны с разрывами в статорных цепях двигателей и дальнейшим включением 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.

На рисунке 4.6 приведены графики моментов, скоростей и статорных токов двигателей каскадного пуска с переключением на полное напряжение питания. 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 переключение двигателей на полное напряжение питания - это приводит к броску тока, и, как видно из графиков, 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.

Данные полученные при этих исследованиях можно представить эмпирической зависимостью относительного значения скорости ω^* , до которой

разогнался двигатель от значения броска тока k_i при каскадном пуске (рисунок 4.7), которую можно выразить следующим уравнением:

$$\omega^* = -0,155k_i + 1,0 \text{ при } 1,5 \leq k_i \leq 3. \quad (4.29)$$

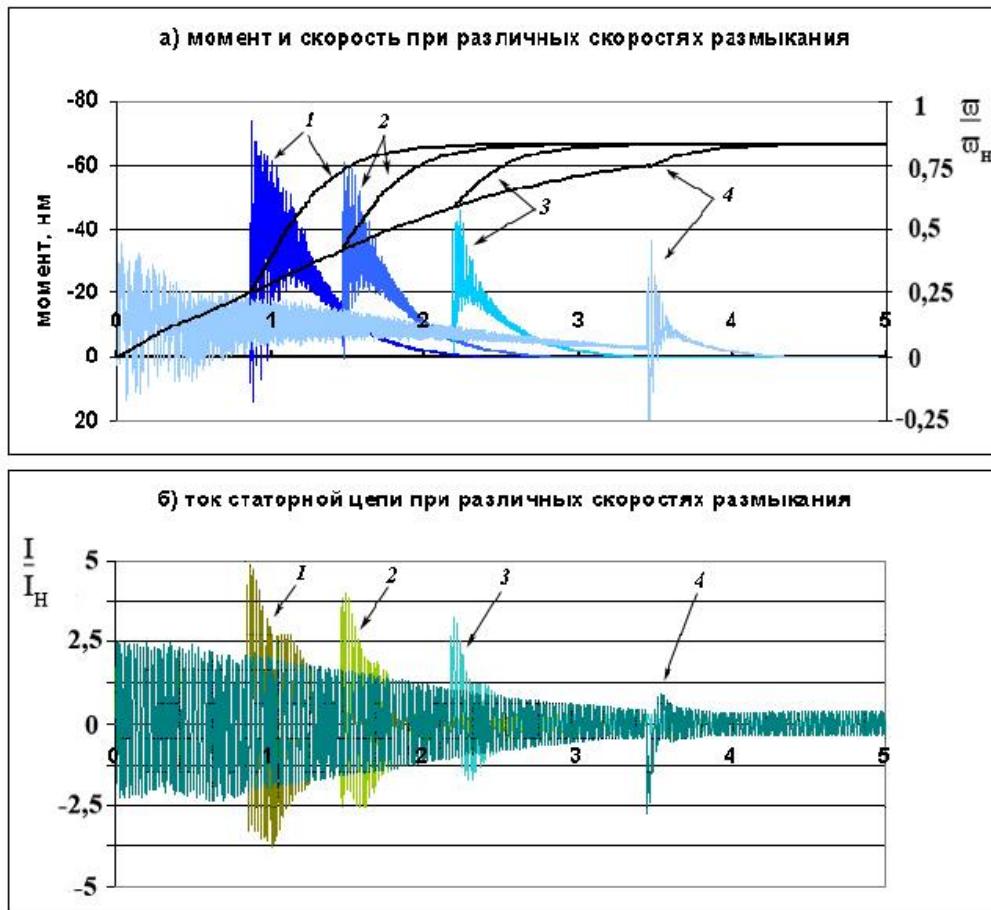


Рисунок 4.6. - Каскадный пуск двигателей с переключением на скоростях
(1 – 30% ном., 2 – 50% ном., 3 – 70% ном., 4 – 90% ном.)

На основании проведенных теоретических исследований делаем вывод о том, что рационально выполнять переключения при достижении скоростей 50 % от номинальной скорости вращения и более.

4.3.3. Влияние на пуск двигателей несоответствие их характеристик

Не существует двух одинаковых двигателей, т.к. в реальных условиях имеется разброс как электрических параметров двигателей, так и геометрических и некоторых конструктивных отличий. Эти параметры, как правило, имеют допуск в пределах $\pm 5 \%$.

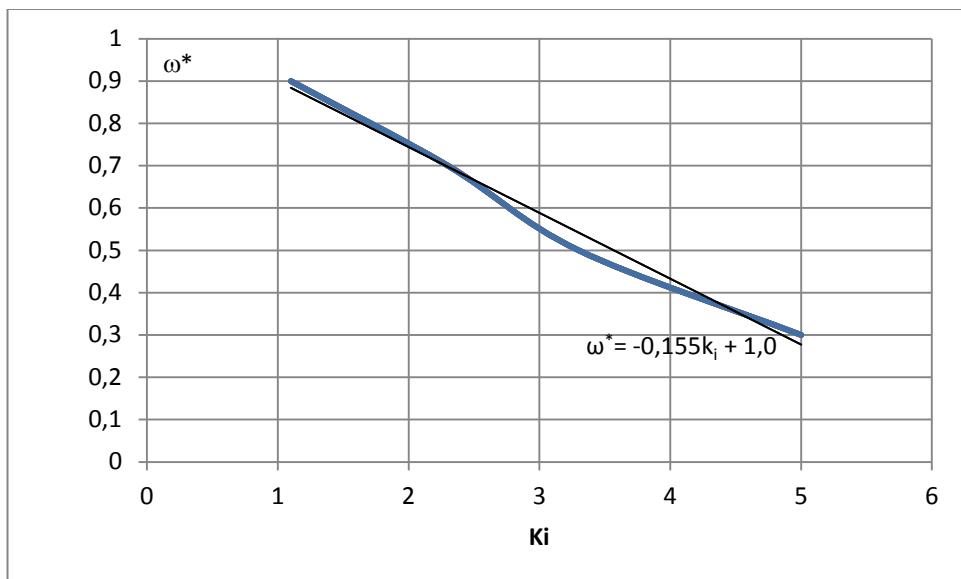


Рисунок 4.7. - Зависимость относительного значения скорости при отключении второго двигателя от броска тока

Исследуем пуск и последующее размыкание двух одинаковых двигателей имеющих различие в сопротивлениях обмоток.

При этом исследуем влияние сопротивления статорной обмотки на пусковые свойства двигателей. Примем это значение равным $0.679 \text{ Ом} \pm 5\%$. На графиках (рисунок 4.8) представлен каскадный пуск двух двигателей с сопротивлениями обмоток статора $R_{\text{ст.обм.}}=0.64 \text{ Ом}$ и $R_{\text{ст.обм.}}=0.7 \text{ Ом}$ (т.е. различающимися на $\pm 5\%$) до частоты вращения 90 % от номинальной и разгон при включении на полное напряжение питания. Как видно из графиков, результаты переходных процессов при пуске не отличаются друг от друга, значит можно говорить о том, что разброс сопротивлений статорных обмоток $\pm 5\%$ не дает различия в процессе пуска.

Как показали исследования, существенные отклонения в величинах сопротивлений статорной обмотки влияют только на длительность переходного процесса после размыкания.

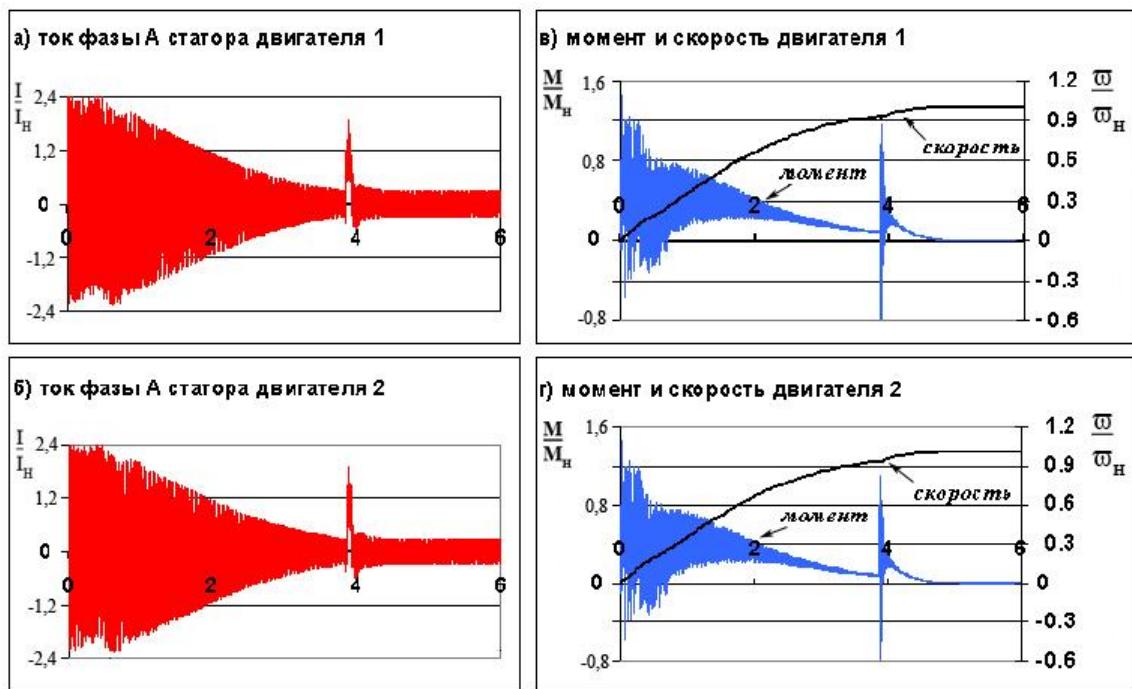


Рисунок 4.8. - Исследование на каскадный пуск расхождения сопротивлений обмоток статора на $\pm 5\%$

Проведем исследования каскадного пуска с различиями сопротивлений стержней ротора двигателей. В роторных цепях отсутствует источник питания и значит, нет вынужденной ЭДС. Сопротивление цепей стержней ротора двигателей определяет, значение индуцируемого тока. Незначительное изменение значения сопротивления стержня ротора влияет на величины наводимых токов, а значит и на величину момента двигателя. В системе каскадного пуска изменение сопротивления стержней ротора будет оказывать влияние на процесс пуска. Исследуем влияние этого различия.

На рисунке 4.9 приведены графики, показывающие каскадный пуск двигателей, различающихся сопротивлением стержней ротора на $\pm 5\%$. Из-за того, что двигатель, имеющий меньшие сопротивление ротора развивает больше момента, то он пускается быстрее и начинает ограничивать мощность второго. Это объясняет то, что двигатель 2 разгоняется медленнее. Следовательно, разница в сопротивлениях стержней ротора должна быть минимальной, в том случае, когда происходит пуск двух двигателей.

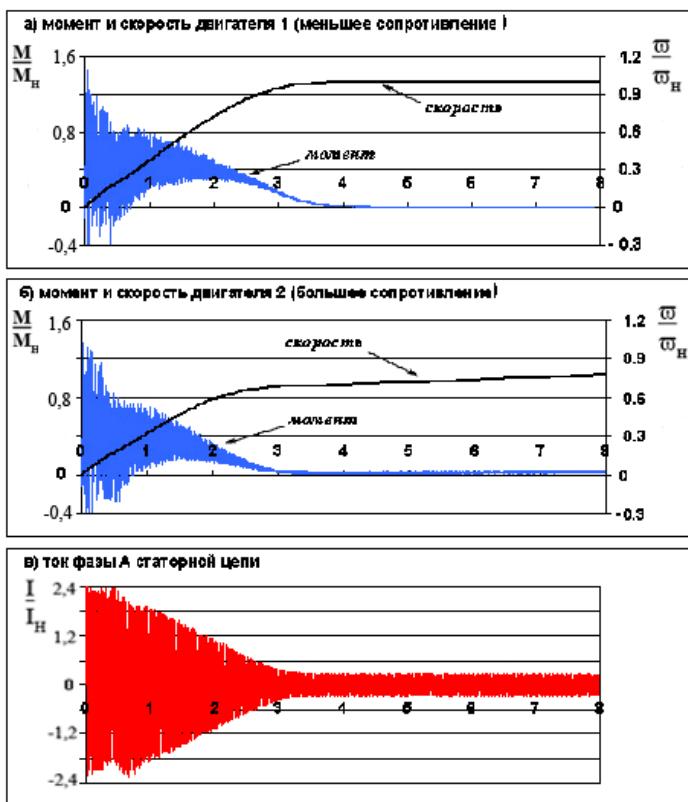


Рисунок 4.9. - Оценка влияния на каскадный пуск отличий сопротивления стержней ротора

Проявление зависимости времени пуска от величины сопротивления ротора меньше отмечается при пуске реальных двигателей, у которых токи в роторе корректно воссоздают форму поля в зазоре и меньше по величине. Проведем исследование при отличиях в параметрах обмоток статора. Многие электродвигатели в процессе эксплуатации многократно подвергаются ремонтам, поэтому зачастую два однотипных двигателя имеют разные параметры. Исследуем случаи пуска двигателей с различными конструктивными отличиями. Под этим подразумеваем как непреднамеренное различие в конструкции после ремонта (разная геометрия статора), так и технологический разброс параметров, проявляющийся при изготовлении. Рассмотрим, и как могут различия в намотке статорной обмотки, различия магнитных свойств сердечника и т.д.

На потокосцепление, влияют, прежде всего, случайные различия параметров намотки и геометрические размеры из-за того, что изменяются свойства обмоток.

Для проверки этого положения исследуем влияние параметров намотки обмоток статора на пусковые режимы асинхронных двигателей при каскадном включении. В расчетах примем, что у первого двигателя обмотка распределена по меньшему количеству пазов, чем у второго двигателя. Поэтому геометрически границы витков изменяются, а именно они определяют размер контура, влияющего на потокосцепление и в конечном итоге на пуск двигателя.

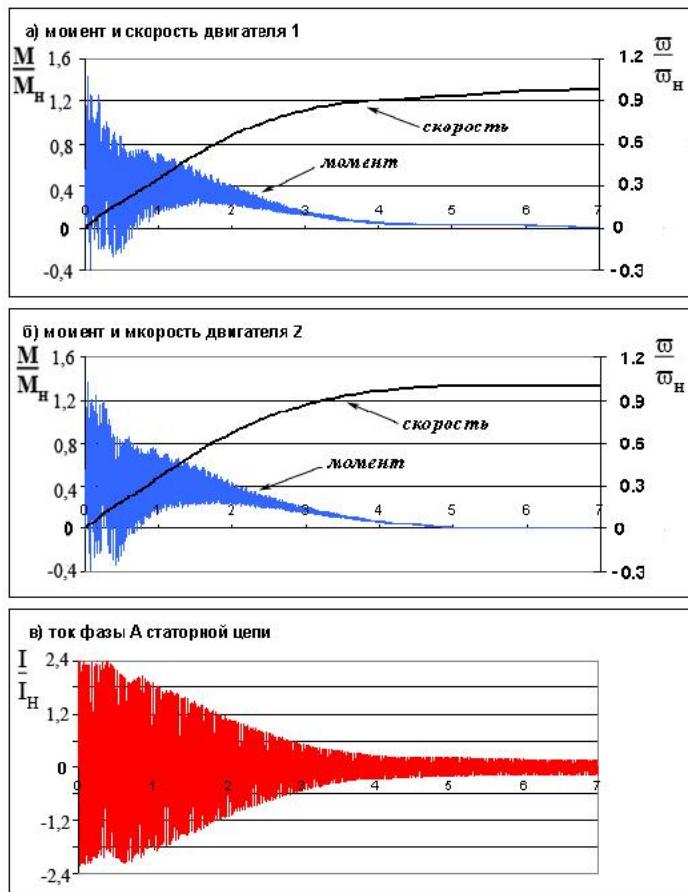


Рисунок 4.10. - Влияние несоответствия в параметрах намотки статорных обмоток двигателей

На рисунке 4.10 приведены расчетные кривые с измененными магнитными свойствами обмоток. Как видно из графиков, это изменение влияет на вид пускового момента, его величину и время пуска.

4.3.4. Влияние характера нагрузки при каскадном пуске

При различной нагрузке на валах пускаемых двигателей существенно изменяется характер переходного процесса. В реальных условиях обеспечить одинаковую величину и характер нагрузки достаточно сложно. В работе исследовалась только часть из возможных соотношений в нагрузке.

Проведем исследования каскадного пуска двигателей с набросом нагрузки на вал одного в ходе разгона, представленного на рисунке 4.11.

Начальные условия при проведении моделирования: двигатели имеют одинаковые характеристики, в процессе пуска на вал одного из двигателей в момент времени 1,2 с происходит наброс нагрузки по величине равной 3 Нм. Как видно из рисунка 4.11 двигатель, к которому прикладывается нагрузка, останавливается, а второй разгоняется до номинальной скорости. Это можно объяснить тем, что прикладывая момент к валу двигателя, изменяя его сопротивление. На основании этого исследования предлагается способ пуска, при котором один из пускаемых двигателей заранее затормаживается или к нему прикладывается большая нагрузка. Патент на изобретение «Способ пуска трехфазного высоковольтного электродвигателя переменного тока» №2415507.

Для электроприводов насосов и вентиляторов, экскгаустеров имеют, по определению, вентиляторную нагрузку. Исследуем пуск двигателей на валу одного из них вентиляторная нагрузка.

Как видно из представленных графиков (рисунок 4.12) двигатель, не имеющий нагрузки на валу, разгоняется до номинальной, а двигатель с вентиляторной нагрузкой пытается разогнаться, но ограничение тока не дает ему выйти на номинальный режим работы.

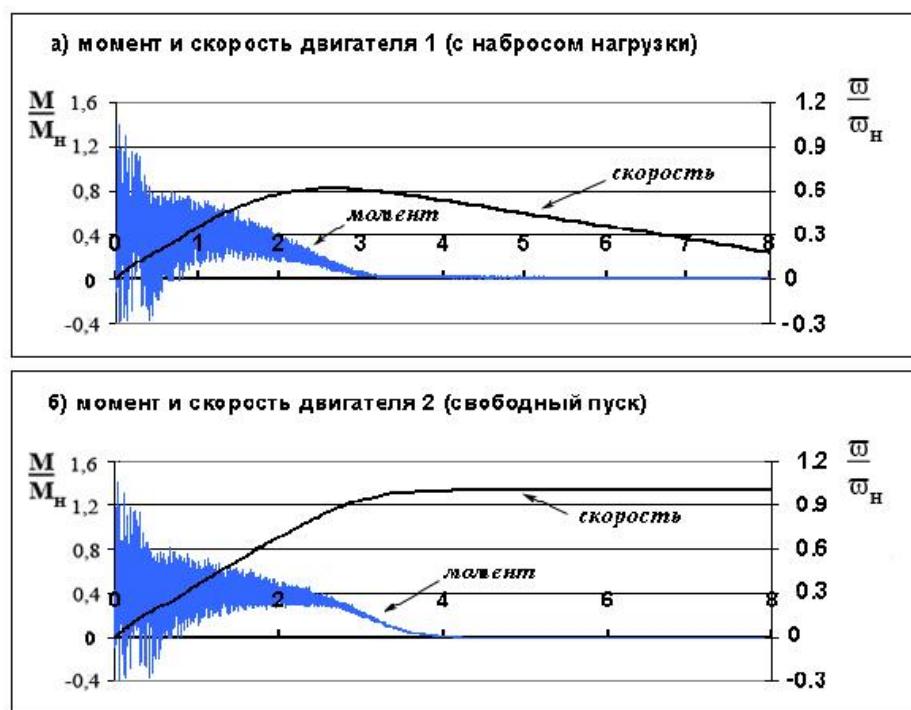


Рисунок 4.11. - Наброс нагрузки в процессе пуска

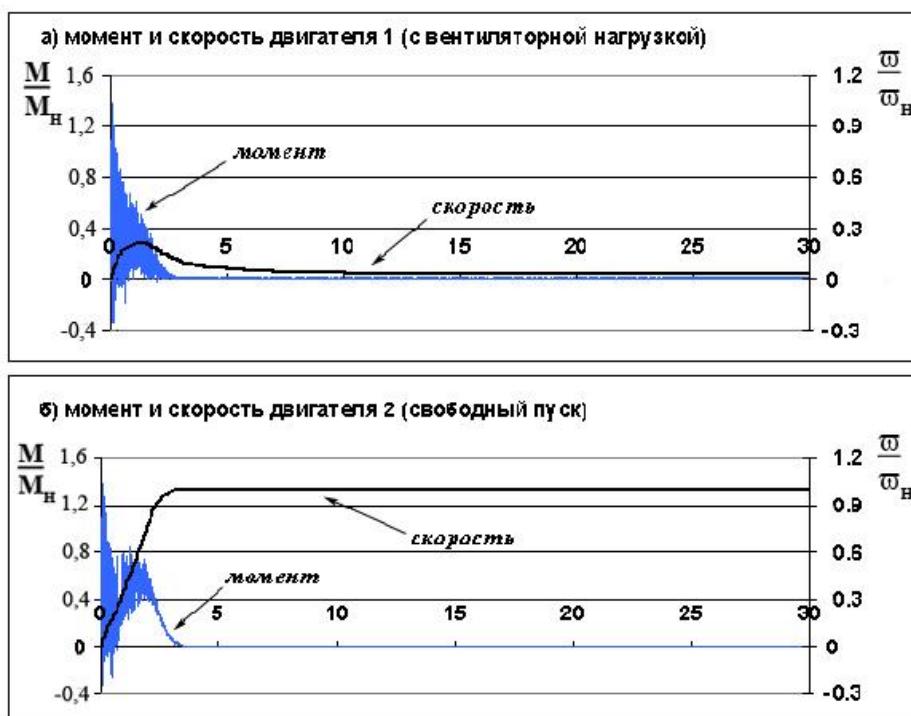


Рисунок 4.12. - Осциллограммы пуска двигателей с вентиляторной нагрузкой

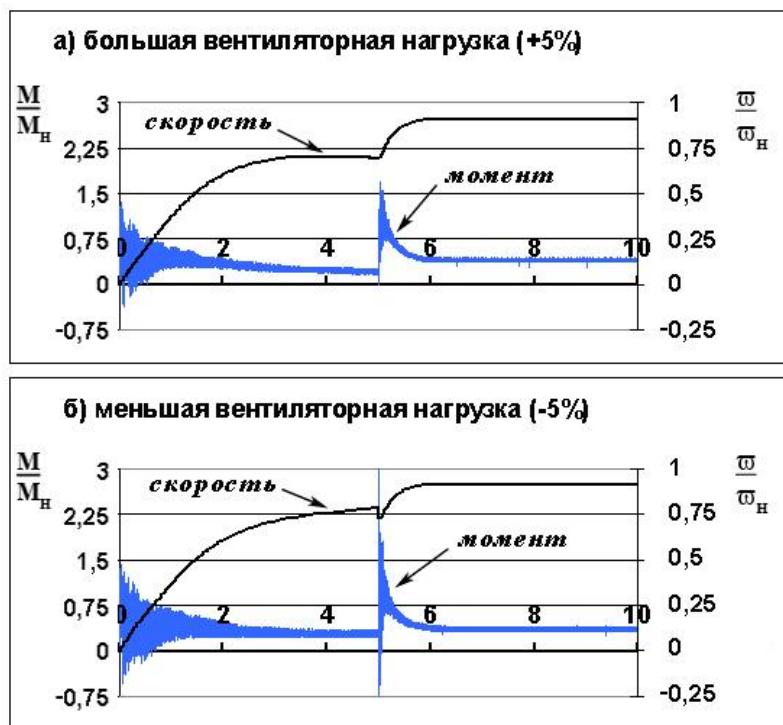


Рисунок 4.13. - Пуск двигателей с вентиляторной нагрузкой различающейся на $\pm 5\%$.

Исследуем пуск двигателей с вентиляторной нагрузкой отличающейся на $\pm 5\%$. Такое изменение математически получается изменением коэффициента при квадрате угловой скорости в формуле связывающий момент нагрузки от скорости двигателя. На рисунке 4.13 показаны результаты этих расчетов.

Как видно на рисунке 4.13 двигатели достигли некоторой промежуточной скорости, соответствующей нагрузке, при переключении на полное напряжение каждый продолжил разгон до номинальной скорости.

Заметная разница в величине нагрузки вентиляторного типа (рисунок 4.14) не привела к изменению характера переходных процессов, показанных выше с вентиляторной нагрузкой, отличающейся на $\pm 5\%$.

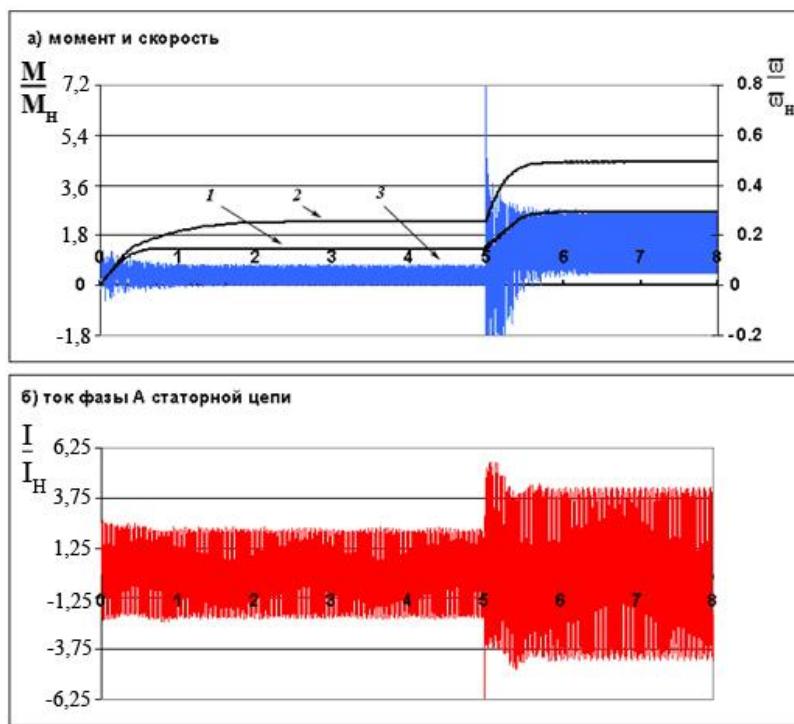


Рисунок 4.14. - Пуск двигателей с вентиляторной нагрузкой различающейся в три раза (1 – скорость двигателя с большой нагрузкой, 2 – скорость второго двигателя, 3 – момент двигателя, б) ток статора двигателя

4.4. Экспериментальные исследования каскадного способа пуска

4.4.1. Лабораторные исследования каскадного пуска. Проверка адекватности модели.

Признаком доказательства адекватности предложенной модели АД является установление сходства качественных и количественных величин, характеризующие основные процессы, полученных на основе модели и результатов лабораторного эксперимента. Для АД существует много типовых процессов, на которых можно увидеть расчетные показатели по диаграммам изменения токов, напряжений, электромагнитного момента, мощности, скорости вращения в таких режимах, как например, пуск электродвигателя, ударное приложение нагрузки и т.д. Из указанных координат, которая получена на модели, будет являться типовой потому, что характер изменения её во времени не будет зависят от характеристик двигателя, а будет характерна для электродвигателя этого типа.

Целью проводимых исследований является сравнение экспериментальных и расчетных данных с целью установления адекватности предложенной модели реальному двигателю при пуске АД при каскадном включении. В лане экспериментов проводились эксперименты от простых к сложным с сравнением с экспериментальными данными. Для проведения экспериментальных исследований процессов пуска асинхронного двигателя при каскадном включении, а также для установления адекватности разработанной модели исследуемой схеме включения была изготовлена экспериментальная установка, схема которой изображена на рисунке 4.15. Описание установки и её работы описаны в [129].

Для лабораторных исследований использовались двигатели SAe26a 380/220 В 2.2/3.8А, 940об\мин, кпд=0.78, 0.8кВт в количестве 5 шт. Измерения сопротивления обмоток статора показало у четырех двигателей 5 % соответствие паспортным данным, у пятого двигателя сопротивление обмоток статора превысило на 12 %.

Для установления адекватности работы модели реальным процессам в двигатели является режим «короткого замыкания». При исследовании процессов при заторможенном роторе позволит установить характер взаимодействия электромагнитных процессов и связь между обмотками двигателя через магнитное поле независимо от электромеханических процессов, появляющихся при вращении ротора.

На рисунке 4.16 представлены экспериментальные и расчетные кривые фазного напряжения и тока для фазы исследуемого АД, полученные в ходе опыта «короткого замыкания». Как видно из приведенных осциллограмм, полученных как экспериментально, так и с помощью модели, после окончания короткого переходного процесса характер изменения тока в фазе двигателя соответствует характеру процессов в RL-цепи [129]. Это говорит о правильном качественном отражении моделью электромагнитных процессов в заторможенном двигателе. Основные результаты, показывающие количественное соответствие

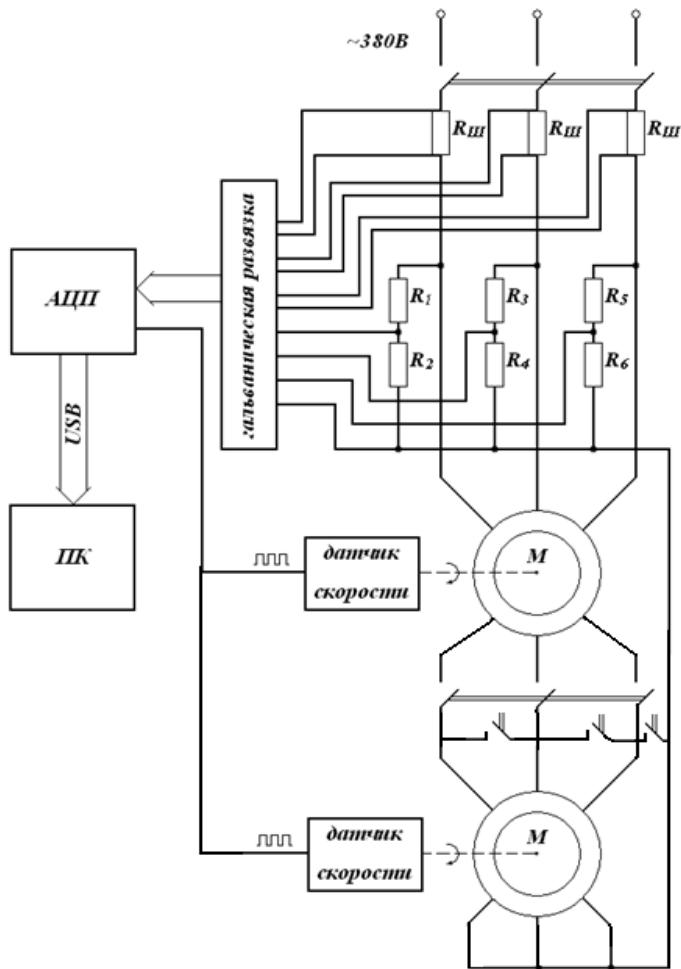


Рисунок 4. 15. - Схема экспериментальной установки

рассматриваемых процессов, сведены в табл. 4.2. Кроме того, в таблице показана величина ошибки между значениями.

Таблица 4.2 - Сравнение результатов опытов короткого замыкания, полученных экспериментально и в ходе моделирования

Параметр	Полученное значение, эксперимент	Полученное значение, модель	Ошибка, %
Амплитуда тока в установившемся режиме, А	6,7	6,9	2,8
$\cos \varphi$ в установившемся режиме	0,78	0,75	3,8

Из таблицы 4.2 можно сделать вывод о том, что результаты моделирования отличаются от экспериментальных данных менее чем на 5 %. Согласно [80], ошибка менее 5 % является несущественной и ей можно пренебречь. На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что разработанная математическая модель асинхронного двигателя адекватно отражает электромагнитные процессы в двигателе при заторможенном роторе.

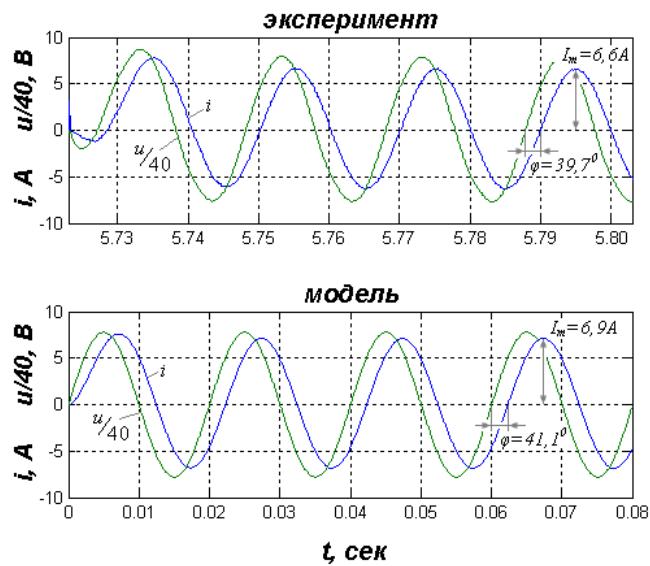


Рисунок 4.16. - Опыт короткого замыкания двигателя, экспериментальные и расчетные данные

Прямой пуск является типовым процессом, иллюстрирующим качество моделирования электромагнитных и электромеханических процессов, и часто приводятся авторами для доказательства адекватности рассматриваемых моделей реальным электродвигателям.

Основополагающую роль в адекватности отражения электромеханических процессов во вращающемся двигателе играет правильность расчета электромагнитного момента. Поэтому необходимо сравнить кривые моментов, рассчитанные через тензор натяжений Максвелла и по классической методике через токи статора и потокосцепления.

В работе [132] изложена методика косвенного определения момента на валу АД, согласно которой момент АД определился как:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_a = u_a - i_a \cdot R \\ e_b = u_b - i_b \cdot R \\ \psi_a = -\int e_a dt \\ \psi_b = -\int e_b dt \\ M_{\mathcal{EM}} = \sqrt{3} \cdot p \cdot (\psi_a \cdot i_b - \psi_b \cdot i_a) \end{array} \right. \quad (4.30)$$

где R - активное сопротивление обмотки статора;

p - число пар полюсов асинхронного двигателя;

$u_a, u_b, i_a, i_b, e_a, e_b, \psi_a, \psi_b$, - мгновенные значения фазных напряжений, токов, Э.д.с. и потокосцепления соответственно;

$M_{\mathcal{EM}}$ - электромагнитный момент асинхронного двигателя.

На рисунке 4.17 представлена кривая электромагнитного момента, рассчитанная через тензор натяжений Максвелла, полученная при моделировании прямого пуска АД. По результатам моделирования была получена еще одна кривая электромагнитного момента АД, рассчитанная косвенным методом по формулам (4.30). Из представленных осцилограмм видно, что кривые моментов, рассчитанные разными способами практически идентичны, за исключением того, что в моменте, рассчитанным моделью, присутствует высокочастотная составляющая, вызванная учетом взаимодействия магнитных полей статора и ротора на уровне отдельных пазов. Все это говорит о том, что методика расчета электромагнитного момента интегрированием тензора натяжений Максвелла полностью согласуется с классическими представлениями теории электрических машин.

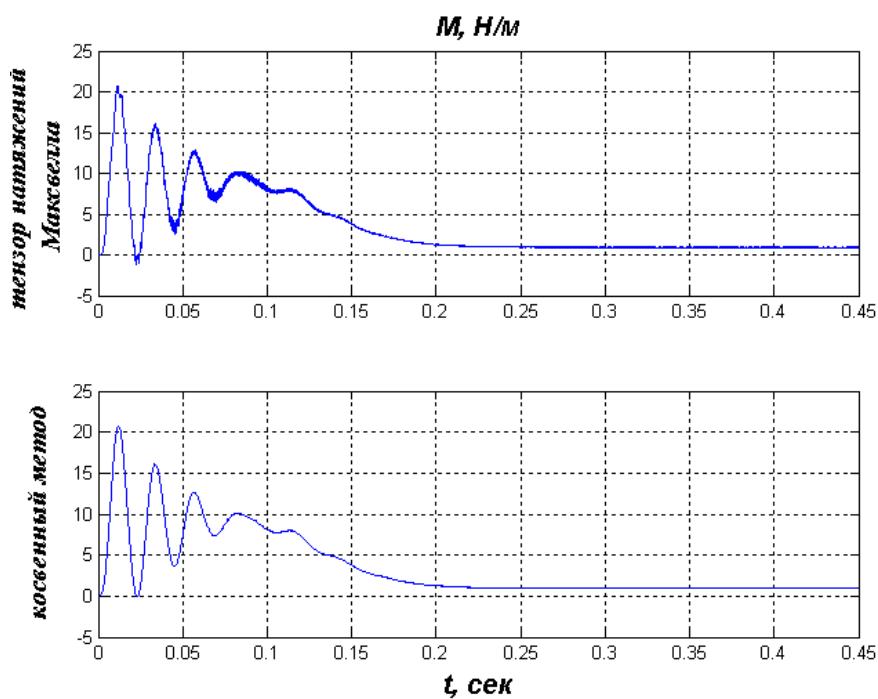


Рисунок 4.17. - Сравнение кривых электромагнитного момента пуска АД, рассчитанных двумя методами

На рисунке 4.18 представлены результаты моделирования прямого пуска выбранного АД типа 4АХ80А4КУ3 при вентиляторной нагрузке. Полученные зависимости $i(t)$, $\omega(t)$, $M(t)$ являются типовыми для АД с короткозамкнутым ротором данной мощности и корректно отражают взаимосвязь координат расчетов.

Для проверки адекватности полученных зависимостей процессам в реальном двигателе было проведено экспериментальное исследование процесса пуска рассматриваемого АД. Соответствующие осциллограммы фазных токов приведены на рисунке 4.18.

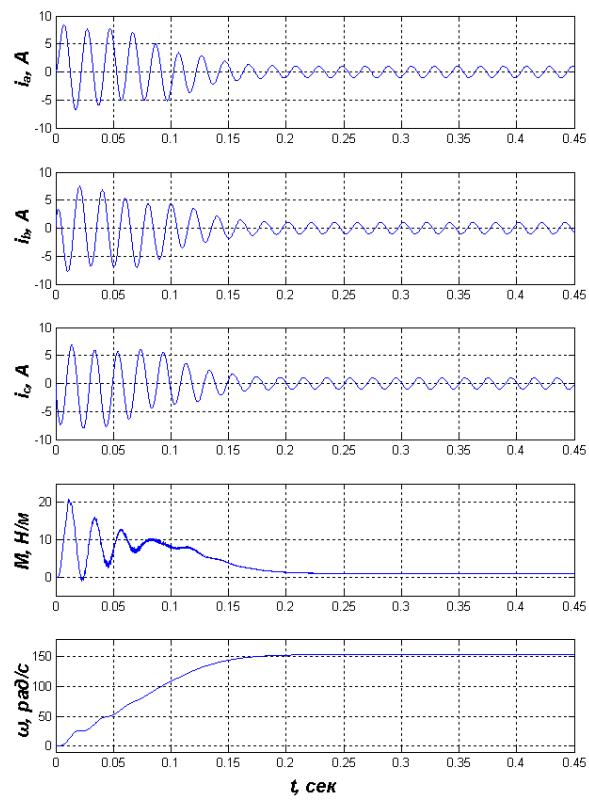


Рисунок 4.17. - Расчетные осциллограммы прямого пуска АД

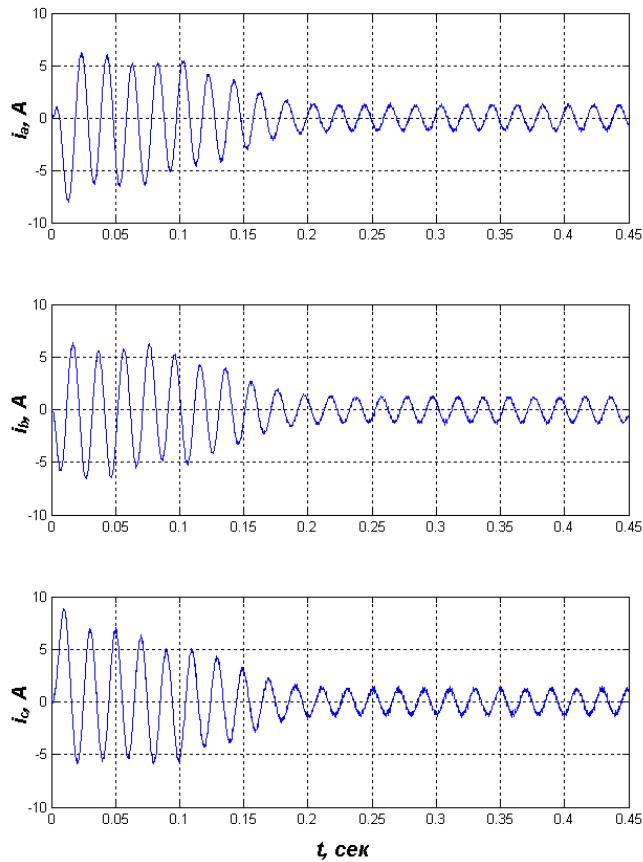


Рисунок 4.18. - Экспериментальные осциллограммы фазных токов прямого пуска АД

При каскадном пуске рассматривались варианты:

- пуск двух последовательно соединенных статоров двигателей с одинаковыми паспортными данными (рисунок 4.19) при этом: - вал второго двигателя заторможен; - вал второго двигателя свободно вращается;
- пуск двух последовательно соединенных статоров двигателей с разными паспортными данными условия проведения эксперимента аналогичны предыдущему случаю.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- начальный бросок тока при каскадном пуске меньше в два раза, чем при прямом пуске одного двигателя, при этом время пуска увеличивается, в данном случае в 2,6 раза;
- при пуске двигателей с разными сопротивлениями обмоток статора, двигатель имеющий большее сопротивление не набирал обороты, это подтверждает проведенные исследования на модели.

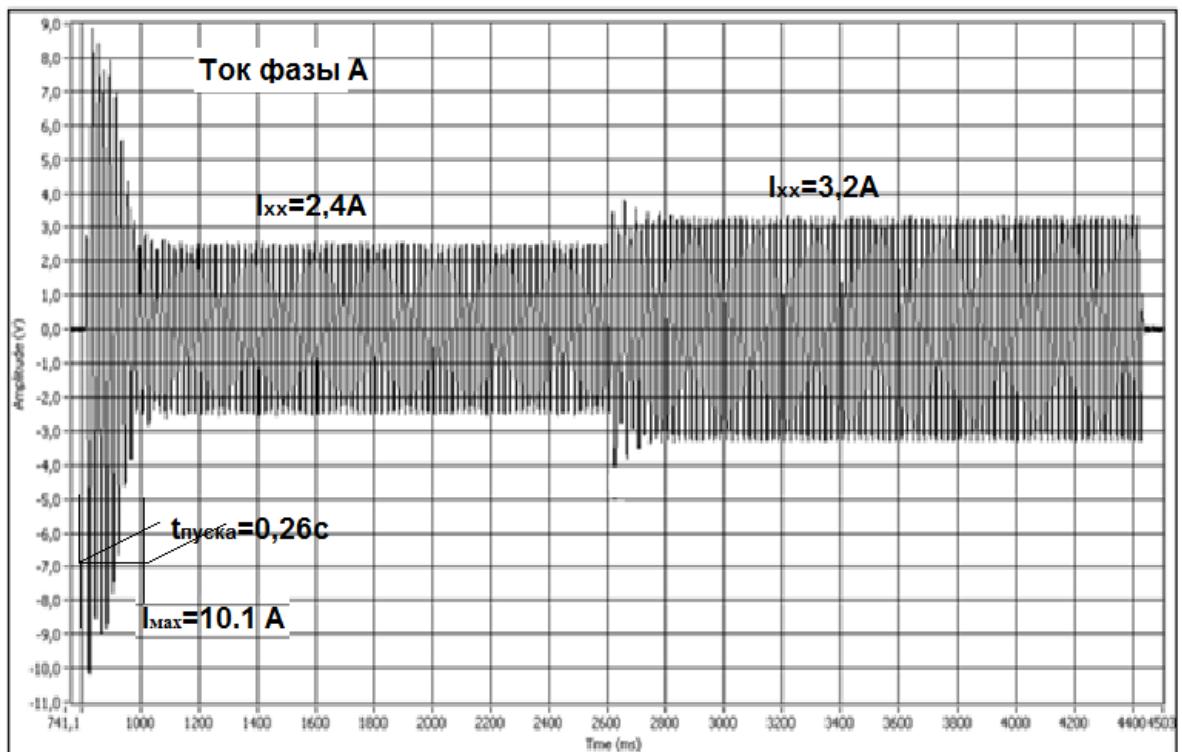


Рисунок 4.19. - Пуск двух двигателей с последовательно соединенными статорами SAe26a 0,8 кВт

4.4.2. Исследования каскадного пуска двигателей насосной станции

Исследования проводились на насосной станции охлаждения электро-печи ООО «Консом». В состав насосной станции входят три контура охлаждения, каждый из которых обеспечивает подачу воды своим двигателем. Непосредственно с основными двигателями расположены резервные, таким образом, станция оборудована шестью однотипными двигателями типа АИР160S2 15 кВт 3000об/мин. Все двигатели имеют параметры не отличающиеся от паспортных более чем на 5 %. Схема электропитания двигателей была переведена на пуск с использованием резервного.

На рисунке 4.20 приведен ток статора двигателя АИР160S2 15 кВт при пуске, а на рисунке 4.21 ток статора при каскадном пуске этих двигателей. Из последнего видно, что начальный бросок тока при пуске снижен в два раза, при увеличении времени пуска в 2,7 раза. Накопленный опыт эксплуатации электроприводов этой станции позволил сделать вывод о возможности применения этого способа пуска [122] для высоковольтных двигателей.

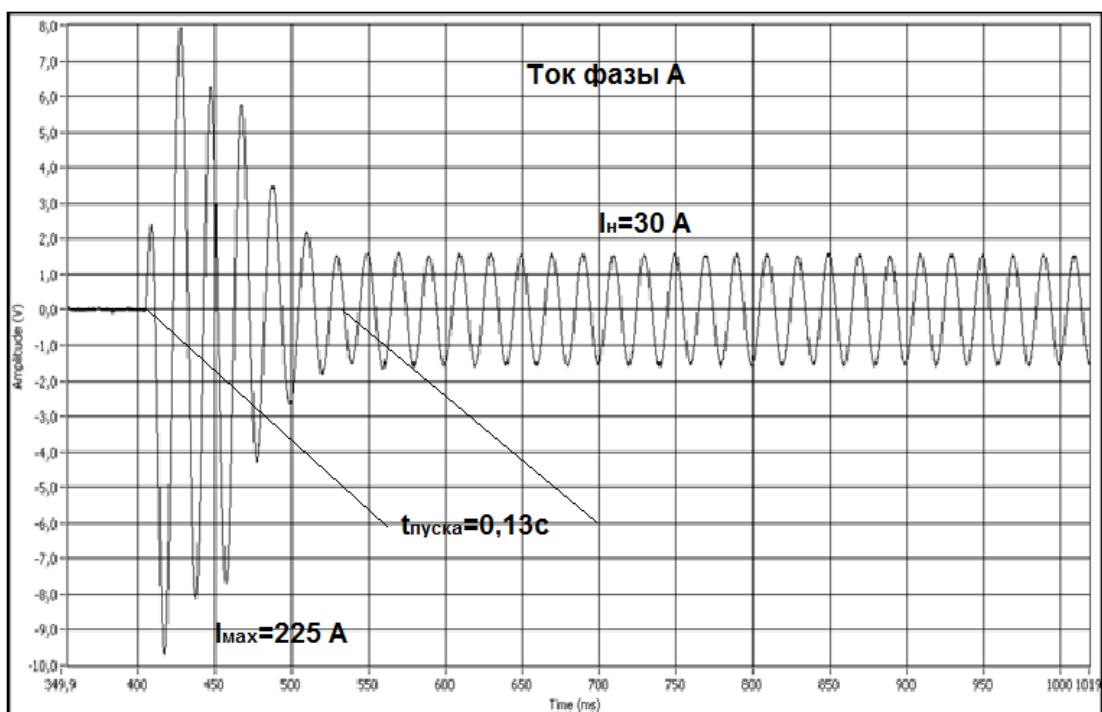


Рисунок 4.20. - Ток статора при каскадном пуске двигателей SAe26a

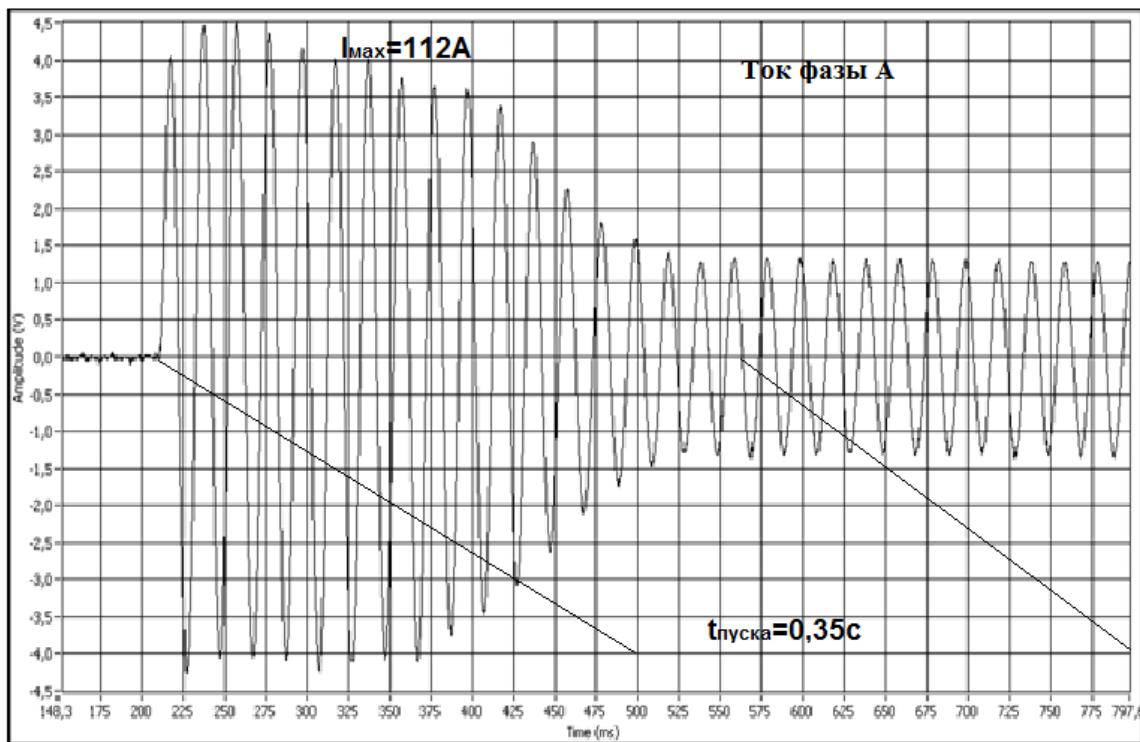


Рисунок 4.21. - Ток статора двигателя АИР160S2 15 кВт при пуске

4.4.3. Исследование каскадного пуска высоковольтных двигателей

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 А4-400Y-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.

Проведенные исследования показали, что:

- при каскадном пуске высоковольтных двигателей максимальный бросок тока снижается в 2 раза (с 524 А до 256 А) рисунок 4.22-4.23;
- происходит увеличение времени пуска с 7,6 с до 15,2 с, т.е. в два раза.

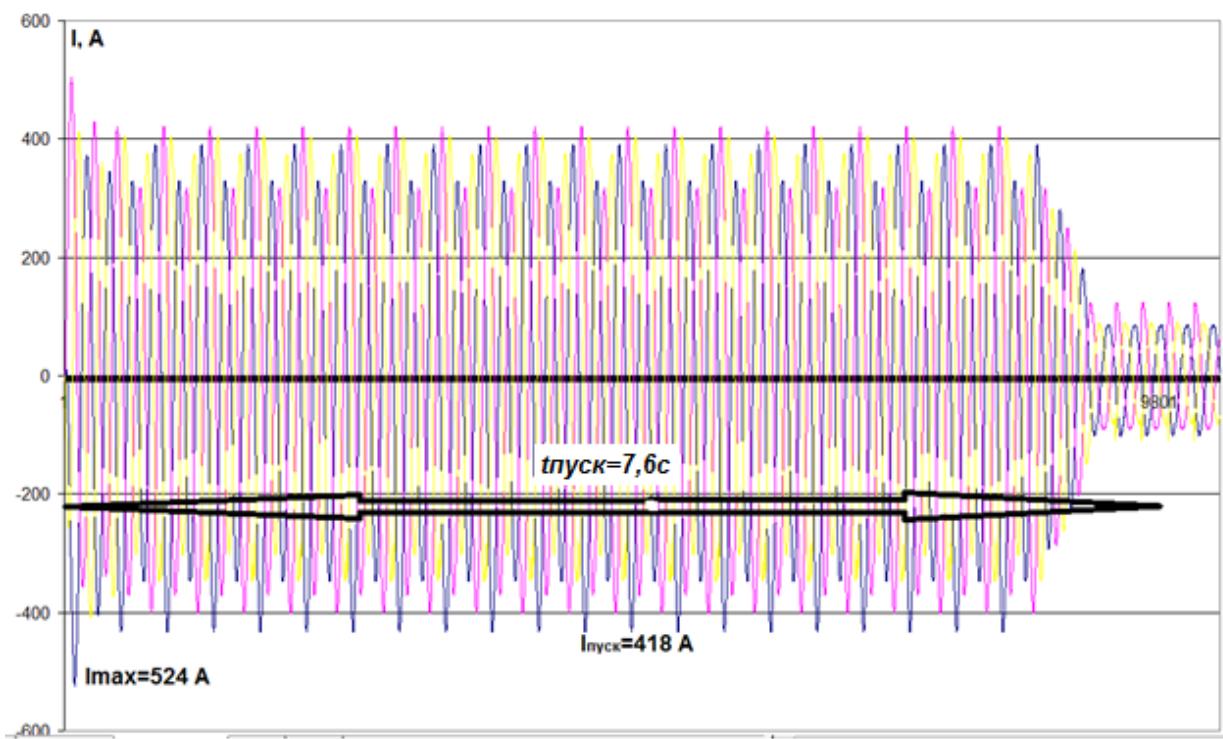


Рисунок 4.22. - Прямой пуск двигателя А4-400Y-4МУ3

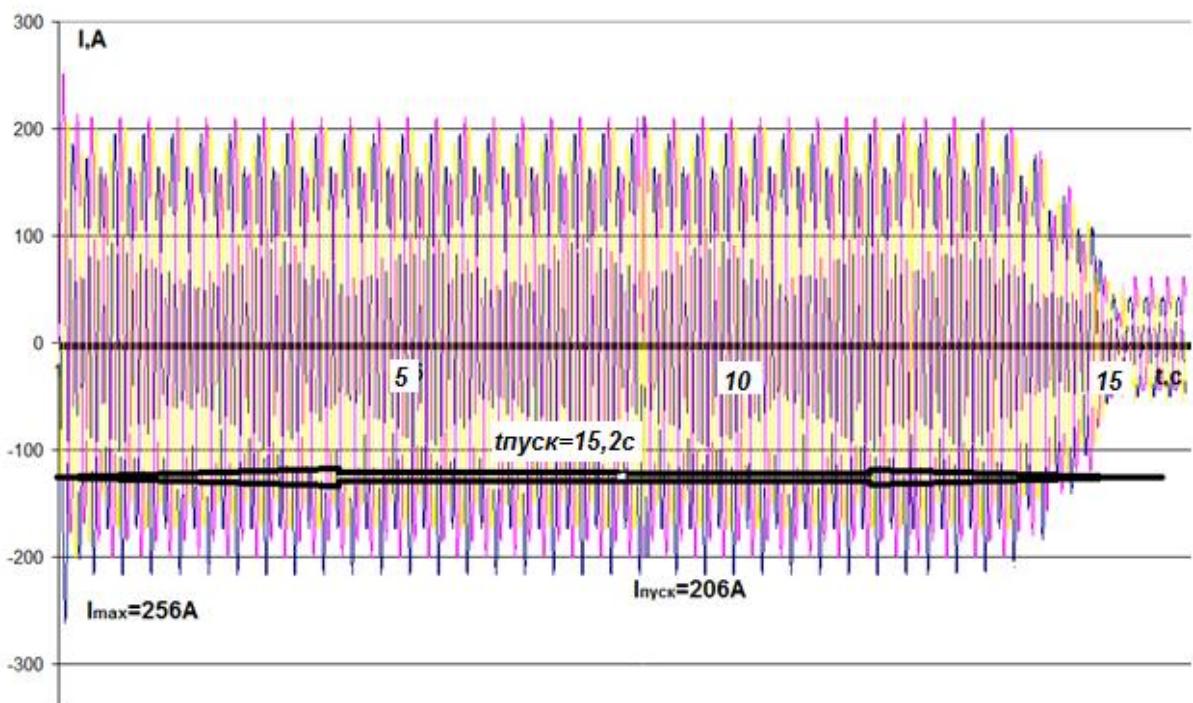


Рисунок 4.23. - Каскадный пуск двигателей А4-400Y-4МУ3

Выводы по главе 4

1. Математическая модель короткозамкнутого асинхронного двигателя была разработана с открытой архитектурой и воплощена в программе *Matlab*, в частности ее инженерном приложении *Simulink*. На основании этой модели

разработана модель двухдвигательной системы электропривода, позволяющая исследовать каскадный пуск асинхронных электроприводов. Проведена оценка адекватности разработанной модели, которая не превышает 5%.

2. Исследования на модели и лабораторные исследования каскадного пуска показали, что в 2 раза уменьшается кратность пускового тока и момента, при этом происходит увеличение времени разгона примерно в 2.5-3 раза.

3. Произведена оценка влияния конструкционных особенностей двигателя на использование его для каскадного пуска (сопротивлений обмоток статора и стержней ротора, магнитной проницаемости стали сердечника, геометрических параметров электродвигателя). Исходя из этих исследований, можно сделать вывод о том, эти различия однотипных двигателей не влияет на каскадный пуск двигателей (т.е. на разгон двигателей до размыкания), а влияет только на последующий индивидуальный разгон.

4. После проведения первого этапа каскадного пуска, происходит переключение двигателя на полное напряжение питания, что приводит к броску тока, его величина будет зависеть от величины скорости, при какой производится этот этап. Исследования показали, что подключение при скорости 70% дает бросок тока, не выше $2I_n$.

5. Опыт эксплуатации каскадного пуска насосной станции с напряжением питания 400В позволил распространить этот способ пуска на высоковольтные электропривода насосной станции напряжения 6кВ, где принят в качестве основного способа пуска.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРНО-ТИРИСТОРНЫХ ПУСКОВЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

5.1. Обзор высоковольтных пусковых устройства для асинхронных электроприводов

На рынке электротехнической продукции в настоящее время имеется большое разнообразие высоковольтных пусковых устройств производства, как зарубежных фирм, так и отечественных разработчиков, реализующие плавный пуск асинхронных двигателей различной мощности и с различным характером нагрузки на валу. Наиболее известные фирмы, например, ИК «Технорос», Санкт-Петербург и АОЗТ «Элетекс», Украина, Харьков, ИЦ Компания «Энергомаш (ЮК) Лимитед», Екатеринбург, ЧКД «Электротехника», Чехия, ABB, Siemens, General Electric, Alstom и т.д. Структурные схемы пусковых устройств можно объединить в несколько групп, это пусковые устройства на базе:

- низковольтных ПЧ с двойной трансформацией напряжения;
- высоковольтных тиристорных инверторов тока (автономных или зависимых) с полууправляемыми вентилями;
- высоковольтных инверторов напряжения с ШИМ;
- многообмоточного трансформатора и многоуровневого инвертора с низковольтными инверторными ячейками;
- высоковольтных инверторов тока с ШИМ.

Так на рисунке 5.1. представлена система мягкого частотного пуска СМПЧ ИК «Технорос», предназначенного для частотного пуска синхронных и асинхронных электродвигателей напряжением 6, 10 кВ, мощностью 1...10 МВт механизмов с вентиляторным характером нагрузки, а также механизмов с тяжелыми условиями пуска (например, приводов шаровых мельниц).

СМПЧ занимает промежуточное место между традиционными устройствами мягкого асинхронного пуска, используемыми для пуска ненагруженных

двигателей (момент сопротивления меньше 0,3-0,4 момента номинального) и преобразователями частоты, применяемыми для регулирования производительности (и соответственно пуска) агрегатов с приводным синхронным и асинхронными двигателями.

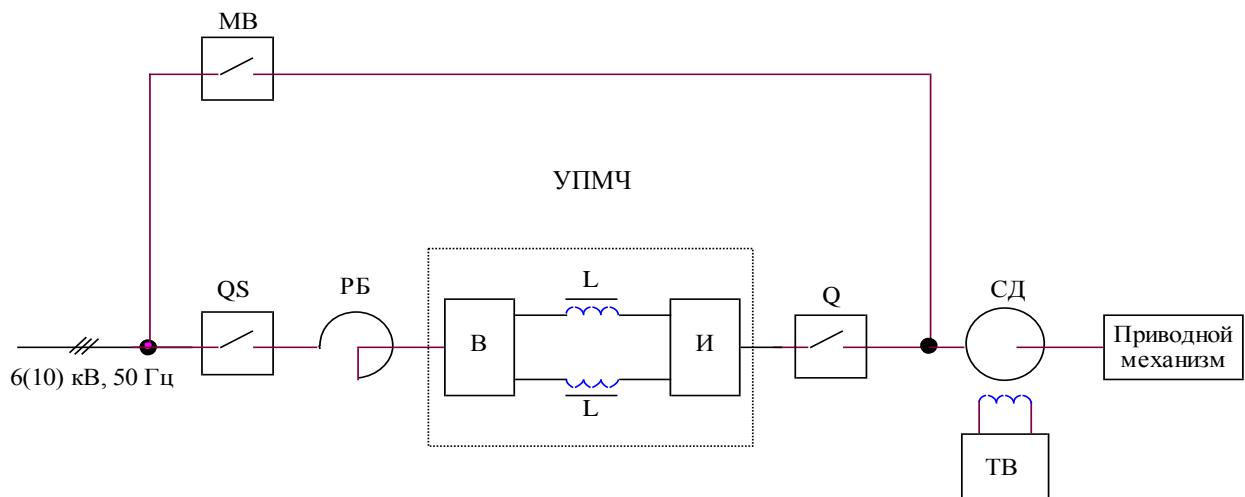


Рисунок 5.1. - Однолинейная функциональная схема электропривода с применением УМПЧ-В фирмы ИК «Технорос»

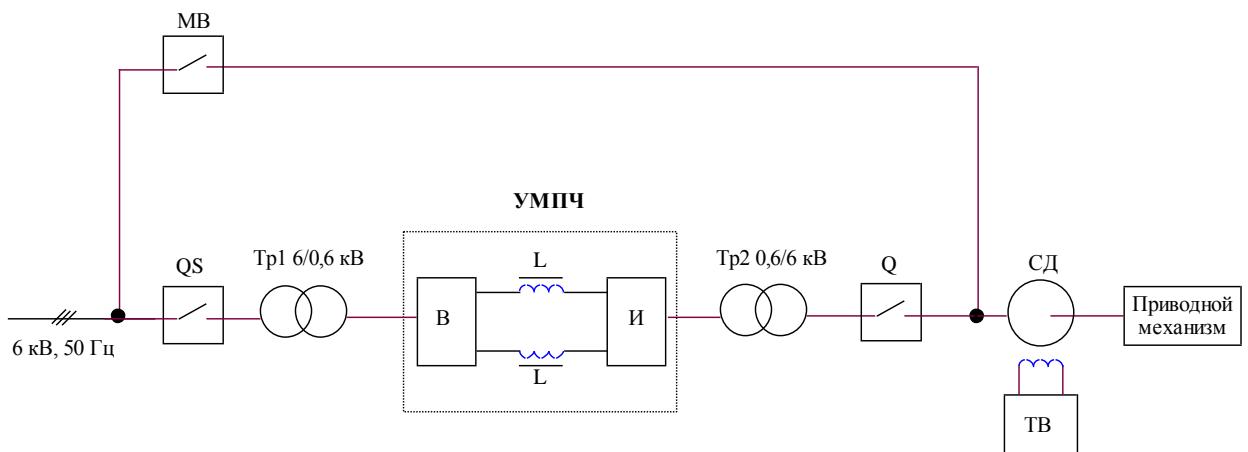


Рисунок 5.2. - Однолинейная функциональная схема электропривода с применением СМПЧ-Н с понижающим входным и повышающим выходными трансформаторами

Наряду, с достоинствами устройств «мягкого» пуска выявлены и их недостатки. Так у устройств низковольтных ПЧ с двойной трансформацией напряжения можно выделить следующие: высокие массогабаритные характеристики; меньшие по отношению к другим схемам КПД (93 – 96 %) и надеж-

ность. Для устройств высоковольтных тиристорных инверторов тока (автономных или зависимых) с полууправляемыми вентилями можно выделить следующие - значительное отрицательное влияние на питающую сеть с точки зрения гармонического состава напряжения (для 5-й гармоники 20 %, для 7-й – 14 %, для 13-й – 7,7 %); повышенное потребление реактивной мощности; повышенный нагрев двигателя в связи с существенно несинусоидальной формой тока статора. Если рассматривать устройства на базе высоковольтных инверторов напряжения с ШИМ: относительно высокая стоимость из-за использования высоковольтных ключей; существует повышенная опасность для изоляции двигателя; ограничение на длину кабеля между преобразователем и двигателем. Для устройств плавного пуска на базе многообмоточного трансформатора и многоуровневого инвертора с низковольтными инверторными ячейками, можно говорить об отсутствие возможности рекуперации электроэнергии в сеть в тормозных режимах; сложная топология, большое количество элементов; необходимость применения специального многообмоточного трансформатора. А для устройств на базе высоковольтных инверторов тока с ШИМ это, прежде всего высокая стоимость, а для обеспечения минимального отрицательного влияния на питающую сеть необходимо применять 18-пульсную схему выпрямления или активный выпрямитель, что еще более повышает стоимость ПЧ.

Как видно из приведенных недостатков пусковых устройств особо стоит отметить их высокую стоимость. Рассмотрим целесообразность применения их с точки зрения стоимостных показателей.

Серийные устройства, как правило, имеют в своем распоряжении избыточные функциональные возможности, за счет этого цена на них высока. Та интеллектуальная составляющая, присутствующая в пусковых устройствах и наличие специализированного программного обеспечения изготовителя, не дают возможности для снижения цены и широкого их внедрения в производство. Для приблизительной оценки эффективности внедрения, учитывающей срок окупаемость преобразователя частоты, применяемого для управляемого

технологического процесса, за счет снижения потребления электроэнергии, можно привести следующее неравенство:

$$P\eta kT \geq C_m \quad (5.1)$$

где P - мощность двигателя, на который устанавливается преобразователь частоты;

η - коэффициент, показывающий долю электроэнергии сэкономленной за счет преобразователя;

k - стоимость кВт·часа электроэнергии;

T - нормативный срок окупаемости, лет;

C_m - стоимость преобразователя частоты, руб.

При выполнении неравенства (5.1), можно говорить об окупаемости проекта в установленные сроки. Срок окупаемости преобразователей, как правило, принимается от полугода до 3 лет. Для примера, возьмем его среднее значение в 1,5 года:

$$T=1,5 \text{ года} \approx 13140 \text{ часов.}$$

Допустим, что преобразователь устанавливается на двигатель мощностью 160 кВт, соответственно мощность преобразователя должна быть не меньше этой величины. Стоимость преобразователя из таблицы 5.1 составит 222 000 рублей [84].

В промышленности стоимость электроэнергии на момент написания работы составляет:

$$k=2,328 \text{ руб./кВт.ч}$$

Тогда, преобразователь окупится только в том случае, если экономия электроэнергии не нарушая технологический процесс, будет составлять:

$$\eta > \frac{C_m}{PkT} = \frac{222\,000}{160 * 2,328 * 13140} \approx 0,073 \quad (5.2)$$

Таблица 5.1- Стоимость преобразователей частоты «ОПТИМ»

Мощность двигателя (кВт)	Серии частотных преобразователей*			
	C 100	C 200	E 380	C 320
0,75	-	7 400	-	-
1,5	7 400	7 800	-	-
2,2	8 400	8 600	-	-
3,7	11 500	12 900	15 310	15 800
5,5	14 200	16 000	20 500	20 900
7,5	17 500	19 800	21 850	22 700
11	21 900	24 900	29 200	30 600
15	26 000	29 000	35 200	37 100
18,5	32 400	36 700	46 100	49 700
22	41 800	46 300	54 450	60 260
30	48 900	55 800	64 650	69 200
37	58 400	64 400	79 800	86 250
45	72 900	83 900	102 000	111 900
55	85 900	97 900	115 950	127 950
75	104 600	119 200	148 300	163 250
90	129 900	141 500	180 800	195 300
110	149 900	169 900	199 310	222 500
132	189 000	214 000	264 220	305 900
160	222 000	242 200	282 700	324 500
185	269 800	296 800	345 150	380 100
200	309 000	339 900	366 450	398 650
220	358 000	388 000	431 150	491 300
250	399 000	437 000	486 650	-
280	433 000	489 000	517 250	-
315	478 000	512 000	557 400	-
350	559 000	589 000	670 500	-
375	630 000	672 000	-	-
400	680 000	-	730 000	-

* Цены указаны с учетом НДС, в рублях

Как видно из простых расчетов, необходима экономия электроэнергии не менее $\eta=7,3\%$.

В соответствии с выражением (5.2), если преобразователь устанавливается для двигателя мощностью 5,5 кВт, эта величина соответствует 0,4 %, а для двигателя мощностью 400 кВт – уже 22,2 %.

В зависимости от установленной мощности двигателя и преобразователя, можно говорить том, что необходимо экономить электроэнергию в диапазоне 0,4 – 22,2 %. И эта экономия необходима только для того, иметь возможность окупить стоимость преобразователя, не учитывая стоимость обслуживания при этом цифры возрастают на порядок.

Как правило, вспомогательные технологические установки имеют значительную установленную мощность, следовательно применять преобразователи частоты в ряде случаев экономически неоправданно. Для того оборудования, которое построено с применением мощного высоковольтного привода принято, что двигатель остается работать даже тогда, когда механические и технологические узлы находятся в ремонте, не говоря о частичном снижении нагрузки. Это определяется, прежде всего, для асинхронных двигателей тяжелыми условиями пуска.

Устройства плавного пуска (таблице 5.2), хоть и дешевле преобразователей частоты, но все же, остаются дорогостоящими [119,195].

Проведем оценку срока окупаемости от применения пусковых устройств, аналогичной представленной ранее для преобразователей частоты. 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 (5.2) требуемой экономии электроэнергии от мощности преобразователя частоты (синяя линия) и устройств плавного пуска (красная линия), при сроке окупаемости в 1,5 года (рисунок 5.3). Зоны 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 линии.

Если будем учитывать, что преобразователи частоты окупаются за счет экономии электроэнергии, то они не окупятся и за 1,5 года, когда они приме-

няются для маломощных двигателей. Экономия электроэнергии, в данном случае, по расчетам больше единицы. Вид условной кривой окупаемости устанавливаемых

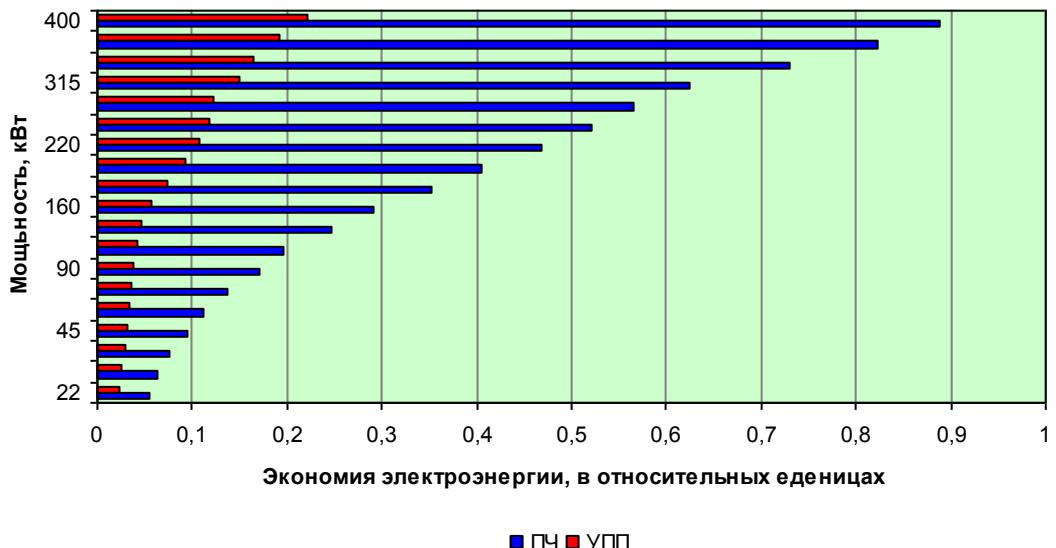


Рисунок 5.3. - Зоны окупаемости устройств

устройств зависит от отношения цены устройства к его мощности. Вид графика на рисунке 5.3 определяет ценовая политика поставщика – спрос на преобразователи малой мощности определяют их высокую цену (на кВт мощности), и как следствие, завышенный срок окупаемости.

Для высоковольтных пусковых устройств сохраняется приведенные выше расчеты. Хотя информацию о стоимости устройств получить трудно, производители ссылаются на то что, «все решения не типовые, поэтому предоставить Вам цены на высоковольтные устройства не можем». Цена и условия определяются после заполнения опросного листа на устройство плавного пуска. Известно, что стоимость определяется в зависимости от типа приводного механизма, наличия шунтирующего контактора и исполнения, а так же условий оплаты и может значительно меняться. Наиболее дорогими считаются устройства HRVS-DN цифровые высоковольтные устройства плавного пуска 50-850 А, 1500-13800 В для тяжелых режимов работы фирмы Solcon. Следующим лидером по производству считается ОАО "Всероссий-

ский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт релестроения с опытным производством" компания АБС «Электро» выпускающие устройства плавного пуска УБПВД-ВЦ. Стоимость УПП начинается от 1500 тыс.рублей.

Таблица 5.2 - Примерные цены на высоковольтные устройства плавного пуска напряжением 6кВ

Тип	Мощность, кВт	Цена, тыс. рубл.	Цена на 1 кВт уст. мощности
УППВ-ТТПТ-40-6000-50	315	748	2,37
УППВ-ТТПТ-50-6000-50	400	836	2,09
УППВ-ТТПТ-63-6000-50	500	935	1,87
УППВ-ТТПТ-80-6000-50	630	1012	1,6

Цифровое высоковольтное устройство плавного пуска серии НРМВ-DN выпускает ЗАО "ТехноСтайл" многопрофильная холдинговая компания. ЗАО «ЭЛЕКТРОТЕКС» г. Орел выпускает серию устройств УППВ-ТТПТ. Примерные цены на которые приведены в таблице 5.2.

5.2. Сущность трансформаторно-тиристорного пуска асинхронного двигателя. Силовые схемы трансформаторно-тиристорных пусковых устройств

Продолжительное время для снижения кратности пусковых токов в высоковольтных электроприводах переменного тока применялись пусковые реакторы. Наибольший эффект получается при пуске двигателей в холостую. Пусковой реактор, включенный последовательно в статорную цепь, ограничивает напряжение питания, а когда ротор достигнет скорости близкой к номинальной, реактор закорачивают, переводя двигатель на полное напряжение питания. При таком переключении не наблюдается значительного броска тока. Для пуска двигателей под нагрузкой эффекта от применения реактора нет,

пусковой ток незначительно ограничивается. Длительность пуска при этом увеличивается в несколько раз.

Мы предлагаем использовать трансформаторы и силовые тиристорные блоки тиристорных преобразователей для использования их в высоковольтных трансформаторно-тиристорных пусковых устройств. На крупных предприятиях, каким является ОАО «ММК», идет постоянная модернизация и часть оборудования, в том числе и электротехнического, высвобождается. Затраты на пусковое устройство для ОАО «ММК» будут незначительны. В [125] рассмотрены несколько вариантов построения пусковых устройств с использованием трансформаторов. Один из вариантов, по которому получен патент на полезную модель, представлен на рисунке 5.4.

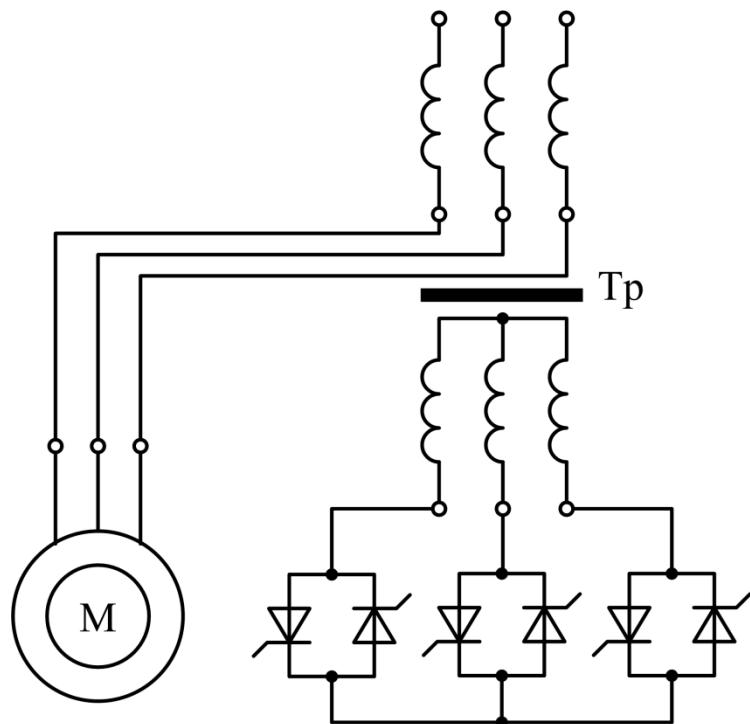


Рисунок 5.4. - Вариант силовой схемы трансформаторно-тиристорного пускового устройства

Рассмотрим работу этого устройства. Когда тиристоры закрыты, вторичная обмотка, да и сам трансформатор, находятся в режиме холостого хода. Эквивалентное сопротивление первичной обмотки велико и двигатель, включенный последовательно с этой обмоткой, заторможен. При открытии тиристоров происходит рост тока, как в первичной обмотке, так и во вто-

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

Процессы, происходящие в такой схеме можно рассмотреть при помощи схемы замещения, представленной на рисунке 5.5. Трансформатор и двигатель представляются Т-образными схемами замещения, а переменное сопротивление Z'_{2H} представляет собой тиристорный преобразователь напряжения, который включен во вторичною обмотку трансформатора.

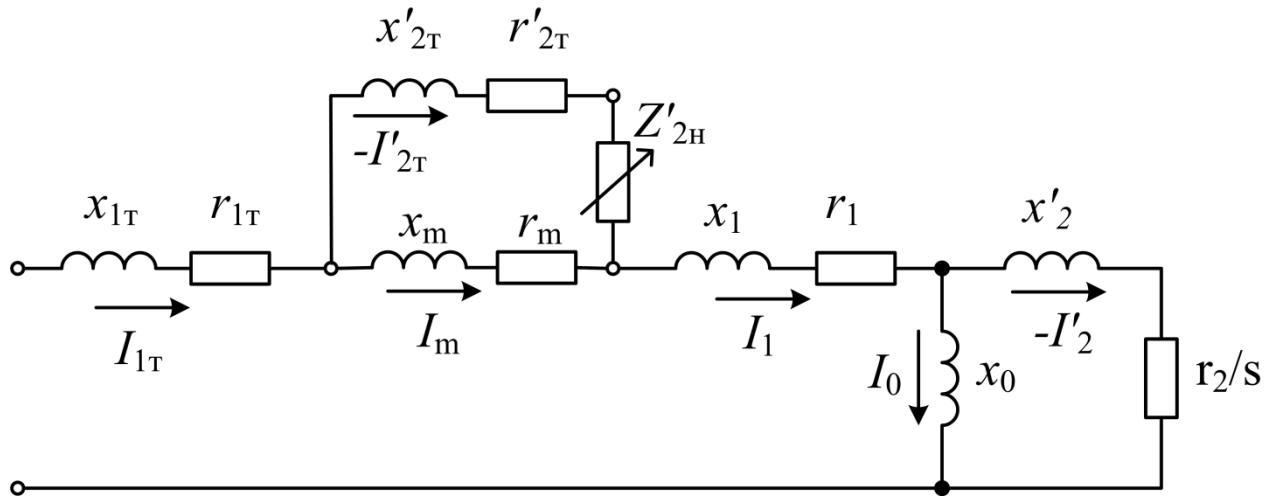


Рисунок 5.5. - «Трансформаторно-тиристорный пускатель – асинхронный двигатель». Схема замещения

Характеристики такого пускового устройства будут определяться только характеристиками трансформатора, который играет роль управляемого переменного сопротивления Z'_{2H} . Основным фактором при этом, будет отношение номинальных напряжений трансформатора и двигателя.

По предварительным расчетам получается, что, если расчетное напряжение трансформатора соответствует номинальному напряжению двигателя, то когда трансформатор находится в режиме холостого хода ток, протекаю-

щий по его первичной обмотке, в десяток раз ниже номинального тока двигателя, а значит, пуск его не состоится.

Если напряжение трансформатора меньше, чем номинальное напряжение двигателя, то трансформатор насыщается и величина тока, протекающего по первичной обмотке достаточна для пуска двигателя. При пуске двигателя до некоторого значения скорости трансформатор переводим в режим короткого замыкания, и процесс пуска заканчивается переводом на номинальное напряжение на его обмотках. В этом случае, плавный пуск двигателя проводится в два этапа.

Установленная мощность трансформатора будет определять перегрузочную способность пускового устройства, так как в конце пуска трансформатор переходит в режим короткого замыкания, а это для него - аварийный режим. Время работы в таком режиме зависит от мощности трансформатора.

Допустимый ток тиристорного преобразователя влияет также на выбор трансформатора для высоковольтного пускового устройства. Предварительная оценка показала, что для трансформатора, у которого номинальное напряжение соответствует напряжению двигателя, токи во вторичной обмотке по окончании пуска достигают значений, превышающих 15kA , что является достаточно большим значением. А для трансформатора, у которого номинальное напряжение ниже номинального напряжения двигателя в 2-3 раза, двигатель пускается при токах вторичной обмотки не больше 6kA .

Существуют схемы, где пуск двигателя проводится без применения тиристорного преобразователя в цепи вторичной обмотки. На схеме подключения приведенной на рисунке 5.6, трансформатор имеет потенциальную связь между первичной и вторичной фазной обмотки.

В представленной схеме на 2-м этапе пуска происходит параллельное включение обмоток трансформатора, так, чтобы вторичная обмотка могла размагничивать трансформатор. При этом фазное напряжение первичной об-

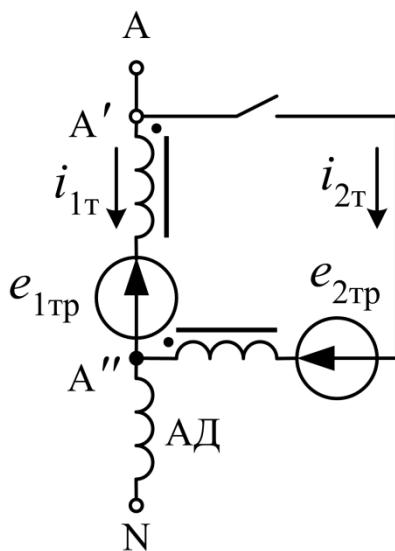


Рисунок 5.6. - Структурная схема пускового устройства на основе трансформатора с потенциальной связью

мотке (точки А' и А'') снижается до величины падения напряжения в цепи вторичной обмотки трансформатора. Этот способ является модификацией реакторного пуска, и мы его не рассматриваем, поскольку его возможности ниже, чем у предлагаемых трансформаторно-тиристорных пусковых устройств. Для определения возможности применения предлагаемых устройств, проведем ряд исследований.

5.3. Предварительные исследования трансформаторно-тиристорного пускового устройства

Области применения пусковых устройств на основе трансформаторно-тиристорного устройства для высоковольтных двигателей переменного тока могут быть весьма обширны, из-за того, что трансформатор является простым и относительно дешевым устройством, а в коммутаторе вторичной обмотки применен мостовой выпрямитель или блок тиристоров, включенных встречнопараллельно.

Предварительно мы провели исследования, показывающие работоспособность такого устройства. На рисунке 5.7 приведены осциллограммы, снятые при пуске асинхронного двигателя АО2-42-4 ($P_n=5,5$ кВт, $I_n=11,3$ А, $U_n=380$ В) от пускового устройства построенного на основе трансформатора

и тиристорного блока. Угол управления α плавно изменялся вручную. Изначально номинальные напряжения трансформатора и двигателя равны между собой. Пуск двигателя происходил регулированием напряжения с помощью ТПН [31].

Из приведенных осциллографм видно, что возможно использовать трансформатор и тиристорный блок в качестве пускового устройства и, самое важное, бросок пускового тока асинхронного двигателя при пуске в холостую не превышает 1,5-кратного значения.

Проведенные предварительные исследования показали и то, что необходимо провести моделирование процесса пуска с этим устройством и определить параметры такого устройства, а затем только переходить к экспериментам на реальных двигателях.

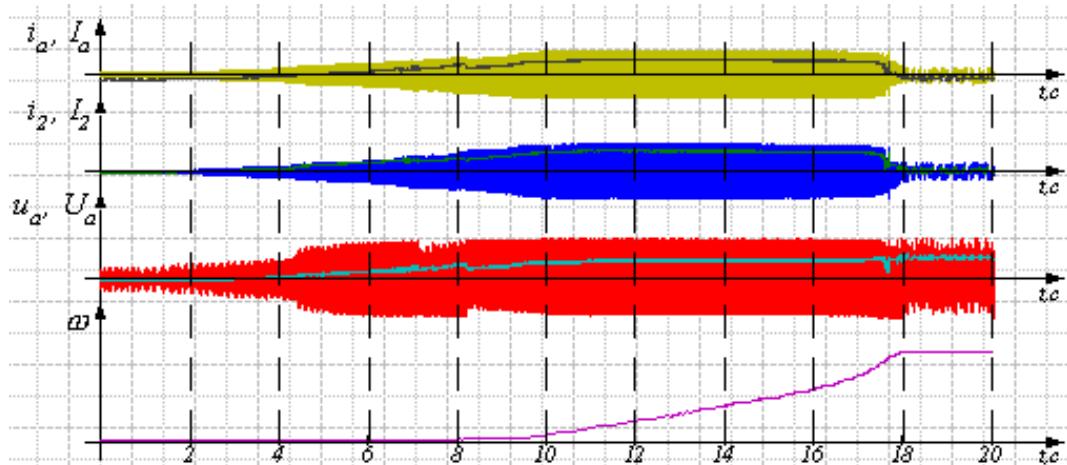


Рисунок 5.7. - Экспериментальные осциллографмы пуска АД

Эти эксперименты необходимы для получения ответа на следующие вопросы: Какой тип трансформатора приемлем для использования в пусковом устройстве, какова должна быть мощность трансформатора, каков оптимальный коэффициент трансформации? Какая должна быть схема включения тиристоров? Какие возможности дает предлагаемое трансформаторно-тиристорное пусковое устройство?

Первый вопрос является наиболее существенным. На этот вопрос имеет два варианта решения либо – необходимо произвести расчет трансформатора для заданных условий, либо – выбираем из серийно выпускаемых. Номенк-

латура выпускаемых силовых трансформаторов достаточно широка, следовательно, второй вариант более предпочтителен.

Из стандартного ряда трансформаторов для двигателей с напряжением 6 кВ могут быть использованы трансформаторы на напряжение 3 кВ и 3,15 кВ, а для двигателей с напряжением 10 кВ – трансформаторы на напряжение 6 кВ, 6,3 кВ, 3 кВ и 3,15 кВ [77, 183]. Исходя из структурной схемы трансформаторно-тиристорного пускового устройства, у трансформатора должна быть первичная обмотка, соединяемая либо в «звезду» либо в «треугольник».

Как отмечалось выше, во вторичную обмотку трансформатора можно подключать тиристоры по схемам, отличным от рисунка 5.4. Предлагаемый вариант соединения тиристоров «треугольником» (на рисунке 5.8) сокращает количество тиристоров и снижает стоимость пускового устройства.

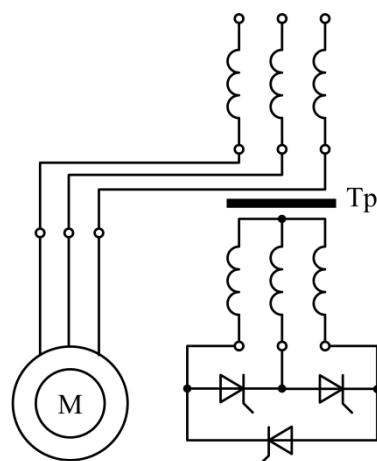


Рисунок 5.8. - Схема соединения тиристоров «треугольником»

5.4. Оценка стоимости трансформаторно-тиристорного пускового устройства и затрат, связанных с его внедрением

Стоимость предлагаемого пускового устройства будет определяться стоимостью трансформатора и тиристорного блока. Для двигателей на напряжение 6 кВ выбор трансформатора осложнено недостатком трансформаторов необходимой мощности на напряжение 3 кВ. Хотя любой из производителей предлагает изготовить трансформатор на заказ по требованию заказчика, цена при этом возрастает на 25 %.

Таблица 5.3 - Стоимость силовых масляных трансформаторов ТМ3

<i>Тип трансформатора</i>	<i>Цена в руб.</i>
TM3 – 400 кВА – 6 кВ	210 000
TM3 – 630 кВА – 6 кВ	291 000
TM3 – 1000 кВА – 6 кВ	422 000

Стоимость широко распространенных силовых масляных трансформаторов ТМ3 мощности, возможной для применения в пусковых устройствах показана в таблице 5.3.

Для предварительного расчета ориентировочно возьмем для пускового устройства трансформатор расчетной мощностью 630 кВА. Учитывая 25% надбавку за нестандартное исполнение, стоимость его составит уже 365 тыс. руб.

Для тиристорного блока выбираем тиристоры Т173-3200-10, приблизительной стоимостью 7,8 тыс. руб. за единицу. В блоке необходимо параллельное соединение двух вентилей. Для предлагаемых схем максимальное количество вентилей 12 на сумму около 94 тыс. рублей.

Для высоковольтных пусковых устройств стоимость начинается с 1,5 мил. рубл., а предварительные расчеты стоимости предлагаемого трансформаторно-тиристорного пускового устройства не превысит величины 540 тыс. рублей.

5.5. Разработка математической модели трансформаторно-тиристорного пускового устройства

5.5.1. Математическое описание асинхронной машины

Оно базируется на уравнениях [2, 8], т.к. машина имеет трехфазную статорную и трехфазную роторную обмотку, при этом эти обмотки питаются от симметричного трехфазного источника напряжения:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Для статора:} \\ u_A = R_A \cdot i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \\ u_B = R_B \cdot i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \\ u_C = R_C \cdot i_C + \frac{d\psi_C}{dt} \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} \text{Для ротора:} \\ u_a = R_a \cdot i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \\ u_b = R_b \cdot i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \\ u_c = R_c \cdot i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \end{array} \right\}. \quad (5.3)$$

Потокосцепления в этих выражениях для статора определяются по формулам:

$$\left. \begin{array}{l} \psi_A = L_{AA} \cdot i_A + L_{AB} \cdot i_B + L_{AC} \cdot i_C + L_{Aa} \cdot i_a + L_{Ab} \cdot i_b + L_{Ac} \cdot i_c \\ \psi_B = L_{BA} \cdot i_A + L_{BB} \cdot i_B + L_{BC} \cdot i_C + L_{Ba} \cdot i_a + L_{Bb} \cdot i_b + L_{Bc} \cdot i_c \\ \psi_C = L_{CA} \cdot i_A + L_{CB} \cdot i_B + L_{CC} \cdot i_C + L_{Ca} \cdot i_a + L_{Cb} \cdot i_b + L_{Cc} \cdot i_c \end{array} \right\}. \quad (5.4)$$

Потокосцепления ротора определяются:

$$\left. \begin{array}{l} \psi_a = L_{aA} \cdot i_A + L_{aB} \cdot i_B + L_{aC} \cdot i_C + L_{aa} \cdot i_a + L_{ab} \cdot i_b + L_{ac} \cdot i_c \\ \psi_b = L_{bA} \cdot i_A + L_{bB} \cdot i_B + L_{bC} \cdot i_C + L_{ba} \cdot i_a + L_{bb} \cdot i_b + L_{bc} \cdot i_c \\ \psi_c = L_{cA} \cdot i_A + L_{cB} \cdot i_B + L_{cC} \cdot i_C + L_{ca} \cdot i_a + L_{cb} \cdot i_b + L_{cc} \cdot i_c \end{array} \right\}. \quad (5.5)$$

Основное уравнение движения в векторном виде:

$$J \frac{d\vec{\omega}_m}{dt} = \vec{M} - \vec{M}_H, \quad (5.6)$$

где J – суммарный момент инерции машины;

$\vec{\omega}_m$ – угловая скорость вращения вала машины;

\vec{M}_H – момент сопротивления.

Тогда электромагнитный момент машины в векторном виде можно представить, как:

$$\vec{M} = k(\vec{\psi} \times \vec{i}). \quad (5.7)$$

Уравнения (5.4-5.7) опираются на мгновенные значения напряжения, тока и потокосцепления статора и ротора, а также активные сопротивления этих обмоток. Так как принимаем, что обмотки симметричные, и то $R_A = R_B = R_C = R_S$ – активные сопротивления статорной обмотки равны между собой, как и активные сопротивления роторной обмотки $R_a = R_b = R_c = R_R$.

Величина потокосцепления каждой обмотки зависит от величины токов всех обмоток; это положение будет проявляться через взаимоиндукцию обмоток. В уравнениях (5.4-5.5) индуктивности $L_{AA}, L_{BB}, L_{CC}, L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}$ являются собственными индуктивностями обмоток, все остальные значения – взаимоиндуктивности между обмотками статора и ротора.

Эти уравнения являются полным и строгим математическим описанием асинхронного двигателя, расчет по этим уравнениям для исследования машины затруднительно, так как:

- в этих уравнениях присутствуют векторные и скалярные величины;
- уравнений в этой системе 16, а количество при буквенных коэффициентов составляет 44;
- коэффициент взаимоиндукции между обмоткой статора и ротором это функция угла поворота ротора относительно статора;
- при расчете электромагнитного момента проявляется нелинейность, т.к. перемножаются величины, изменяющиеся во времени.

Упростить систему уравнений позволит метод, основанный на использовании пространственного вектора [120]. Метод основан на том, что мгновенные величины переменных состояния преобразуются математически так, что они заменяются одним пространственным вектором.

Это преобразование представляется уравнением:

$$\vec{x} = \frac{2}{3}(x_A + \vec{a} \cdot x_B + \vec{a}^2 \cdot x_C), \quad (5.8)$$

где $\vec{a} = e^{\frac{j2\pi}{3}}$, $\vec{a}^2 = e^{\frac{j4\pi}{3}}$ – поворотные векторы, учитывающие геометрическое расположение обмоток.

$$\text{Если } x_A = x_m \cdot \cos(\omega t), \quad x_B = x_m \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right), \quad x_C = x_m \cdot \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right),$$

тогда

$$\vec{x} = \frac{2}{3}x_m \left(\cos(\omega t) + e^{\frac{j2\pi}{3}} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + e^{\frac{j4\pi}{3}} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right) = x_m e^{j\omega t}. \quad (5.9)$$

Если рассматривать неподвижную систему координат (α, β) любой из векторов тока, напряжения и потокосцепления может быть представлен как в алгебраической, так и показательной форме:

$$\vec{x}_H = x_\alpha + j \cdot x_\beta = x_m \cdot e^{j\psi_x}. \quad (5.10)$$

Тот же самый вектор может быть представлен во вращающихся координатах (x, y) в виде:

$$\vec{x}_{Bp} = x_x + j \cdot x_y = x_m \cdot e^{j(\psi_x - \alpha_k \cdot \bar{t})} = \vec{x}_H \cdot e^{-j\alpha_k \cdot \bar{t}}, \quad (5.11)$$

где $\bar{t} = \omega_1 \cdot t = 2\pi \cdot f_1 \cdot t$ и $\alpha_k = \frac{\omega_k}{\omega_1}$.

Уравнения, связывающие неподвижную систему координат и вращающуюся и обратное преобразование можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} \vec{x}_{Bp} &= \vec{x}_H \cdot e^{-j\alpha_k \cdot \bar{t}}. \\ x_x &= x_\alpha \cdot \cos(a_k \cdot \bar{t}) + x_\beta \cdot \sin(a_k \cdot \bar{t}) \\ x_y &= x_\beta \cdot \cos(a_k \cdot \bar{t}) - x_\alpha \cdot \sin(a_k \cdot \bar{t}) \\ x_\alpha &= x_x \cdot \cos(a_k \cdot \bar{t}) - x_y \cdot \sin(a_k \cdot \bar{t}) \\ x_\beta &= x_y \cdot \cos(a_k \cdot \bar{t}) + x_x \cdot \sin(a_k \cdot \bar{t}) \end{aligned} \right\}. \quad (5.12)$$

Проекция вектора (x_α, x_β) на вектор мгновенных значений для каждой из фаз (x_A, x_B, x_C) производится по выражениям:

$$x_A = x_\alpha, x_B = -\frac{1}{2} \cdot x_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot x_\beta, x_C = -\frac{1}{2} \cdot x_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot x_\beta. \quad (5.13)$$

Обратное преобразование можно осуществить по выражениям:

$$x_\alpha = x_A, x_\beta = \frac{x_B - x_C}{\sqrt{3}}. \quad (5.14)$$

Приведенные выше преобразования уравнений от мгновенных значений к уравнениям в пространственных векторах позволяют получить систему уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} \vec{u}_S = R_S \cdot \vec{i}_S + \frac{d\vec{\psi}_S}{dt} \\ \vec{u}_R = R_R \cdot \vec{i}_R + \frac{d\vec{\psi}_R}{dt} \\ \vec{\psi}_S = L_S \cdot \vec{i}_S + L_m(\theta) \cdot \vec{i} \\ \vec{\psi}_R = L_m(\theta) \cdot \vec{i}_S + L_R \cdot \vec{i}_R \end{array} \right\}, \quad (5.15)$$

где L_S, L_R –индуктивность, соответственно статора и ротора;

$L_m(\theta)$ – взаимная индуктивность статора и ротора.

Значения коэффициентов взаимной индукции переменны в уравнениях определяющих потокосцепления потому, что уравнения равновесия ЭДС статора записываются для неподвижной системы координат, привязанной к статору, а уравнения, записанные для равновесия ЭДС ротора привязаны к врашающейся системе координат. Метод пространственного вектора позволит привести уравнения для единой системы координат, которая вращается с произвольной скоростью ω_k . Тогда, для этого пространственного вектора уравнения могут быть представлены как:

$$\left. \begin{array}{l} \vec{u}_S = R_S \cdot \vec{i}_S + \frac{d\vec{\psi}_S}{dt} + j \cdot \omega_k \cdot \vec{\psi}_S \\ \vec{u}_R = R_R \cdot \vec{i}_R + \frac{d\vec{\psi}_R}{dt} + j \cdot (\omega_k - \omega) \cdot \vec{\psi}_R \\ \vec{\psi}_S = L_S \cdot \vec{i}_S + L_m \cdot \vec{i}_R \\ \vec{\psi}_R = L_m \cdot \vec{i}_S + L_R \cdot \vec{i}_R \end{array} \right\}, \quad (5.16)$$

где $\omega = p \cdot \omega_m$, p – число пар полюсов машины.

Раскладывая пространственные вектора по осям, система уравнений становится:

$$\left. \begin{array}{l} u_{S\alpha} = R_S \cdot i_{S\alpha} + \frac{d\psi_{S\alpha}}{dt} - \omega_k \cdot \psi_{S\beta} \\ u_{S\beta} = R_S \cdot i_{S\beta} + \frac{d\psi_{S\beta}}{dt} + \omega_k \cdot \psi_{S\alpha} \\ u_{R\alpha} = R_R \cdot i_{R\alpha} + \frac{d\psi_{R\alpha}}{dt} - (\omega_k - \omega) \cdot \psi_{R\beta} \\ u_{R\beta} = R_R \cdot i_{R\beta} + \frac{d\psi_{R\beta}}{dt} + (\omega_k - \omega) \cdot \psi_{R\alpha} \\ \psi_{S\alpha} = L_S \cdot i_{S\alpha} + L_m \cdot i_{R\alpha} \\ \psi_{S\beta} = L_S \cdot i_{S\beta} + L_m \cdot i_{R\beta} \\ \psi_{R\alpha} = L_m \cdot i_{S\alpha} + L_R \cdot i_{R\alpha} \\ \psi_{R\beta} = L_m \cdot i_{S\beta} + L_R \cdot i_{R\beta} \end{array} \right\}. \quad (5.17)$$

Выражение для вычисления электромагнитного момента двигателя в этом случае принимает вид:

$$M = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_R} \cdot (\psi_{R\alpha} \cdot i_{S\beta} - \psi_{R\beta} \cdot i_{S\alpha}), \quad (5.18)$$

В уравнениях системы (5.17) все коэффициенты являются величинами постоянными, физически определены и рассчитываются исходя из паспортных данных двигателя.

Можно еще более упростить систему уравнений, перейдя к безразмерным величинам [80]. Для этого необходимо определить базовые величины, принимают за базовые амплитудные номинальные значения фазного напряжения U_b , тока I_b и номинальное значение угловой частоты ω_b . За базовые величины всех переменных и коэффициентов, входящих в уравнения, а также за значение базового времени принимаем:

$$R_b = \frac{U_b}{I_b}, \quad L_b = \frac{U_b}{\omega_b \cdot I_b}, \quad \Psi_b = \frac{U_b}{\omega_b}, \quad M_b = \frac{3}{2} p \frac{I_b \cdot U_b}{\omega_b}, \quad t_b = \frac{1}{\omega_b}.$$

Относительные координаты выражаются как результат деления реальных значений на базовые:

$$\bar{u} = \frac{\vec{u}}{U_b}, \quad \bar{i} = \frac{\vec{i}}{I_b}, \quad \bar{\Psi} = \frac{\vec{\Psi}}{\Psi_b} - \text{относительные значения электромагнитных}$$

переменных двигателя;

$\alpha_k = \frac{\omega_k}{\omega_b}$, $v = \frac{\omega_m}{\omega_b}$ – относительные величины частот вращения статора

и ротора;

$m = \frac{M}{M_b}$ – относительный момент на валу машины;

$r_s = \frac{R_s}{R_b}$, $r_R = \frac{R_R}{R_b}$, $x_s = \frac{\omega_b L_s}{R_b}$, $x_R = \frac{\omega_b L_s}{R_b}$, $x_m = \frac{\omega_b L_m}{R_b}$, $\bar{T}_m = \frac{J\omega_b^2}{M_b}$ отно-

сительные величины.

Для исследования АД с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат принимаем начальные условия в виде $\bar{u}_R = 0$, $\omega_k = 0$, $\alpha_k = 0$. С учетом последнего, система (5.17) приводится к виду:

$$\left. \begin{aligned} u_{S\alpha} &= r \cdot i_{S\alpha} + x'_s \frac{di_{S\alpha}}{d\bar{t}} - \frac{k_R}{\bar{T}_R} \psi_{R\alpha} - k_R p v \psi_{R\beta} \\ u_{S\beta} &= r \cdot i_{S\alpha} + x'_s \frac{di_{S\beta}}{d\bar{t}} - \frac{k_R}{\bar{T}_R} \psi_{R\beta} + k_R p v \psi_{R\alpha} \\ 0 &= -k_R r_R \cdot i_{S\alpha} + \frac{1}{\bar{T}_R} \psi_{R\alpha} + \frac{d\psi_{R\alpha}}{d\bar{t}} + p v \psi_{R\beta} \\ 0 &= -k_R r_R \cdot i_{S\beta} + \frac{1}{\bar{T}_R} \psi_{R\beta} + \frac{d\psi_{R\beta}}{d\bar{t}} - p v \psi_{R\alpha} \\ m &= k_R (\Psi_{R\alpha} \cdot i_{S\beta} - \Psi_{R\beta} \cdot i_{S\alpha}) \\ \bar{T}_m \frac{dv}{d\bar{t}} &= m - m_h \end{aligned} \right\}, \quad (5.19)$$

где $r = (r_s + k_R^2 r_R)$, $x'_s = \left(x_s - \frac{x_m^2}{x_R} \right)$, $k_R = \frac{x_m}{x_R}$, $\bar{T}_R = \frac{x_R}{r_R}$.

В системе уравнений (5.19) время принимается как безразмерное

$$\bar{t} = \frac{t}{t_b} = \omega_b t.$$

5.5.2. Математическое описание процессов происходящих в трансформаторе

Состояние трансформатора, имеющего n обмоток, можно описать системой состоящей из n уравнений [38]:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \left(r_1 \cdot i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} \right) + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} + \dots + M_{1n} \frac{di_n}{dt} \\ u_2 &= M_{21} \frac{di_1}{dt} + \left(r_2 \cdot i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \right) + M_{23} \frac{di_3}{dt} + \dots + M_{2n} \frac{di_n}{dt} \\ u_3 &= M_{31} \frac{di_1}{dt} + M_{32} \frac{di_2}{dt} + \left(r_3 \cdot i_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} \right) + \dots + M_{3n} \frac{di_n}{dt} \\ &\dots \\ u_n &= M_{n1} \frac{di_1}{dt} + M_{n2} \frac{di_2}{dt} + M_{n3} \frac{di_3}{dt} + \dots + \left(r_n \cdot i_n + L_n \frac{di_n}{dt} \right) \end{aligned} \right\}. \quad (5.20)$$

В этой системе $r_1, r_2, r_3 \dots r_n$ – активные сопротивления каждой из обмоток; $L_1, L_2, L_3 \dots L_n$ – индуктивности обмоток трансформатора, определяемые как $L_1=M+L_{\sigma 1}, L_2=M+L_{\sigma 2}$ и т. д.; $M_{12}, M_{13} \dots M_{1n}$ и т. д. – взаимные индуктивности обмоток; $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}, L_{\sigma 3} \dots L_{\sigma n}$ – индуктивности рассеяния каждой обмотки; $u_1, u_2, u_3 \dots u_n, i_1, i_2, i_3 \dots i_n$ – соответственно мгновенные значения напряжений и токов в n -обмоточном трансформаторе.

Система уравнений (5.20) будет описывать процессы преобразования электрической энергии в любом из состояний трансформатора, как в переходных, так и в установившихся режимах при учете нелинейности параметров трансформатора и возможности исследования при несинусоидальности и несимметрии напряжения питания [68]. Использовать такую систему для анализа работы трансформатора нецелесообразно из-за того, что решение получаем только при постоянных параметрах уравнений.

На практике оказывается, что коэффициенты уравнений существенно не линейны и являются функцией от нескольких переменных, таких как токи обмоток, температуры окружающей среды и обмоток самого трансформатора

и времени. Для решения этой системы нелинейных дифференциальных уравнений применяются численные методы [48, 88-90].

Для упрощения расчетов трансформатор можно представить схемой замещения, показанной в [77], и его можно представить как на рисунке 5.9. В такой схеме трансформатор представляется как идеальный преобразователь ЭДС имеющий коэффициент трансформации $n = e_1/e_2 = w_1/w_2$. Индуктивности рассеяния и активные сопротивления обмоток принимают постоянными и в схеме представлены как элементы R_1, R_2 и L_1, L_2 . Активные потери на гистерезис и вихревые токи в сердечнике учитывает сопротивление R_m . В этой схеме элемент L_m представляет нелинейной индуктивностью и показывает намагничивание сердечника. Кривая намагничивания материала сердечника определяет вид и характер нелинейности.

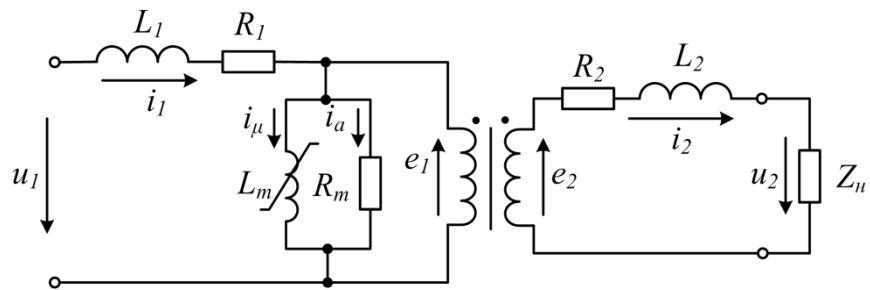


Рисунок 5.9. - Схема замещения трансформатора

Для схемы замещения, представленной на рисунке 5.9, можно привести следующие системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \left(R_1 \cdot i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} \right) - e_1 \\ u_2 &= e_2 - \left(R_2 \cdot i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \right) \\ i_1 &= i_\mu + i_a + \frac{i_2}{n} \end{aligned} \right\}. \quad (5.21)$$

$$\left. \begin{aligned} 0 &= i_a R_a - L_m (i_\mu) \frac{di_\mu}{dt} \\ e_1 &= L_m (i_\mu) \frac{di_\mu}{dt} \end{aligned} \right\}. \quad (5.22)$$

В этих системах уравнения (5.22) будут описывать цепь намагничивания трансформатора. Когда известна зависимость $L_m(i_\mu)$ уравнения (5.21), (5.22) определяют координаты трансформатора как в динамических, так и в стационарных процессах. Решение их могут быть найдены как численными методами, так и использованы при разработке модели трансформатора в пакете *Simulink* [167].

5.5.3. Выбор пакета программ для построения модели пускового устройства

Приведенные выше системы уравнений могут быть решены различными методами. Мы решаем эту задачу в пакете *Simulink*, а именно, в его расширении *SimPowerSystems*. Расширение *SimPowerSystems* содержит библиотеку электрических машин, элементов силовой электроники, источников питания, а также измерительных приборов и других электротехнических элементов. На основе этой библиотеки можно построить и провести исследования электротехнической модели любой сложности. В том случае, если элементы отсутствуют, их можно реализовать на основе элементарных блоков *Simulink* [167]. Как показал обзор литературы, для решения задачи разработки модели трансформаторно-тиристорного пускового устройства *SimPowerSystems* содержит почти все необходимые библиотечные блоки, кроме того, основные модели этого устройства – асинхронный двигатель и трансформатор построены на основании дифференциальных уравнений (5.17), (5.18) и (5.21), (5.22) [94].

Можно предложить и другие варианты выполнения модели - на языке программирования высокого уровня или перевод систем уравнений в операторную форму и их решение в пакете *Simulink* в виде функциональных моделей. На рисунке 5.10 представлена модель асинхронного двигателя, реализованная на основании уравнений (5.19) [68].

Эта модель наглядна и может быть модифицирована. Ее использование целесообразно тогда, когда есть необходимость моделирования нового блока

или есть необходимость в учете процессов, не описанных в библиотеке, например, как влияние насыщения магнитной цепи асинхронного двигателя. Для других вариантов считается, что в применении специальных блоков нет необходимости. Сравнивая, результаты моделирования исследования функциональной модели (рисунок 5.10) с результатами полученными при использовании библиотечного блока *SimPowerSystems* «*Asynchronous Machine SI units*» можно отметить практическое их совпадение.

5.5.4. Моделирование пуска асинхронного двигателя

Проведя исследования прямого пуска асинхронного двигателя можно дать оценку адекватности модели и реального двигателя. На рисунке 5.11 представлена модель в *SimPowerSystems*, позволяющая исследовать пуск двигателя при включении на полное напряжение питания (прямой пуск). В этой

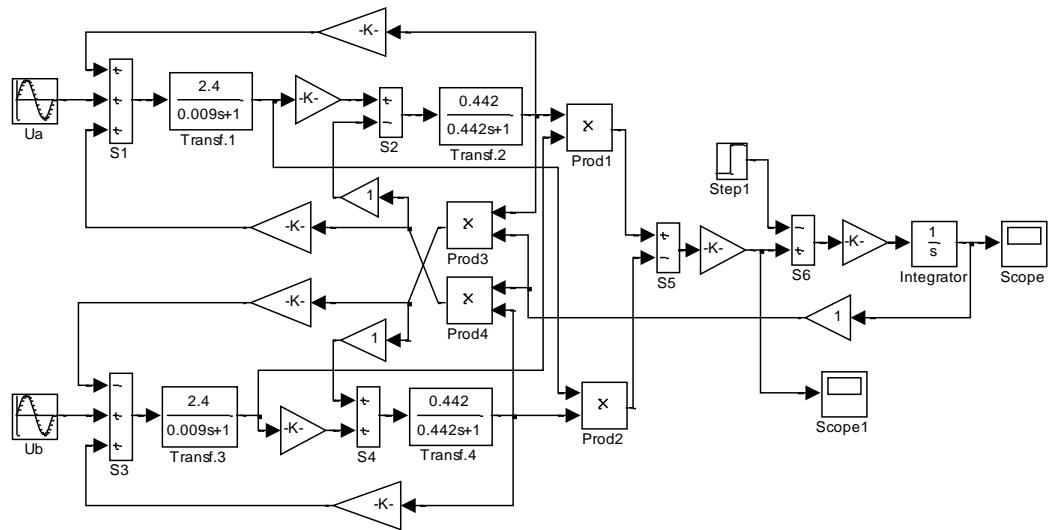


Рисунок 5.10. - Модель асинхронного двигателя в операторной форме модели можно реализовать различный характер нагрузки двигателя. Особенность каждого блока можно посмотреть в литературе [23, 69, 167]. При реализации этой модели с помощью переключателя S1 выбираем характер нагрузки на валу - или вентиляторная, или имеем постоянный момент сопротивления. Специализированный блок «Vent» воспроизводит уравнение: $M=M_{xx}+k\omega^2$. Блок «Scope» реализует зависимость действующих значений

координат двигателя от времени (ток статора, скорость вращения ротора и момент сопротивления на валу).

Для определения необходимых величин их значения и графики выводятся на дисплей осциллографа.

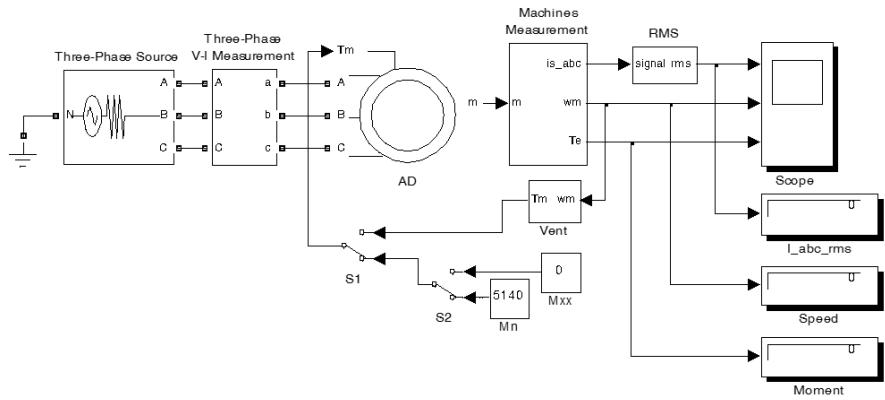


Рисунок 5.11 - Модель для исследования пуска асинхронного двигателя

Для получения результатов моделирования, адекватных реальным, необходимо определить параметры схемы замещения. Как правило, их рассчитывают на основании паспортных данных [161].

Как показали расчеты, при таком подходе, адекватно можно описать процессы только в стационарных режимах, а в динамических, каким является пуск, прежде всего тем, что в процессе пуска происходит изменение величин в цепи ротора R'_r и L'_r за счет эффекта вытеснения тока в стержнях ротора и насыщения коронок зубцов в нем[41].

Таблица 5.4 - Паспортные данные двигателя ДАЗО-450У-4У1

P_h , кВт	n , об/мин	η , %	cosφ	I_h , А	k_i	M_h	m_{π}	m_{\max}	J , $\text{kz} \cdot \text{м}^2$
800	1480	95,1	0,89	91	7	5140	1,2	2,6	300

Погрешность расчетов становится больше, чем больше мощность двигателя. Для двигателя, паспортные данные которого представлены в таблице 5.4 кратность пускового тока, полученная при моделировании больше в два раза паспортного значения. Таким образом, в исследованиях параметры R'_r и L'_r изменены так, чтобы кратность пускового тока k_i соответствовала

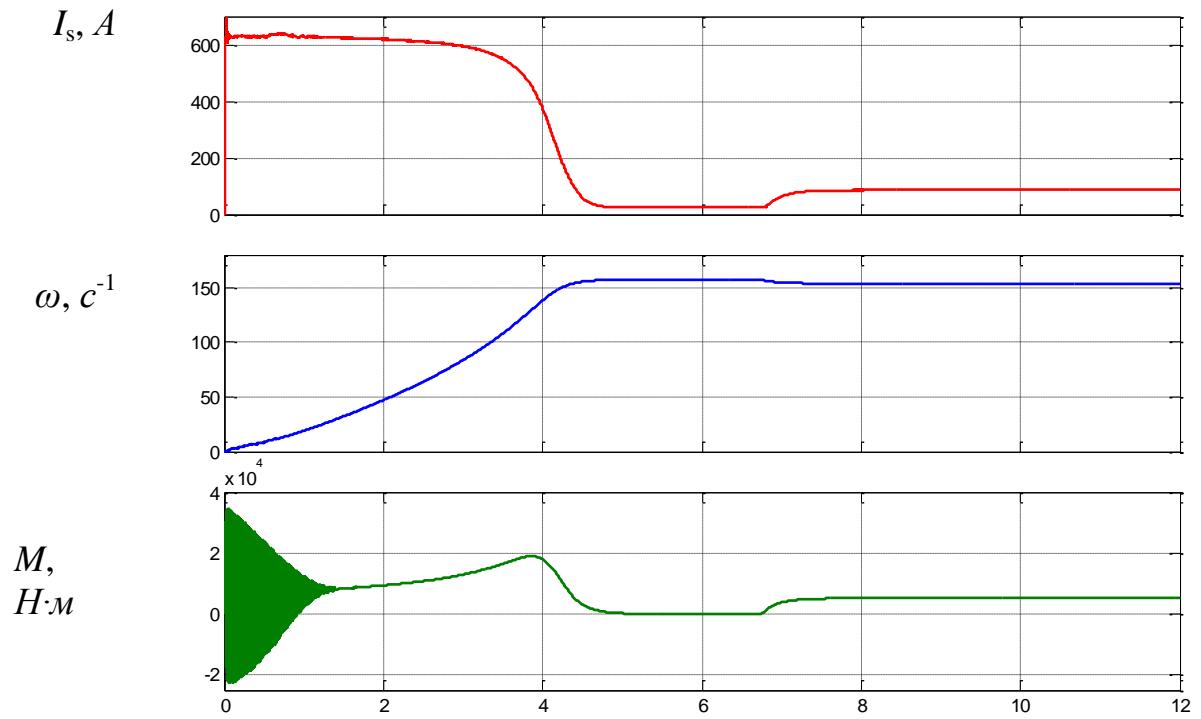


Рисунок 5.12. - Осциллограммы пуска АД с набросом нагрузки

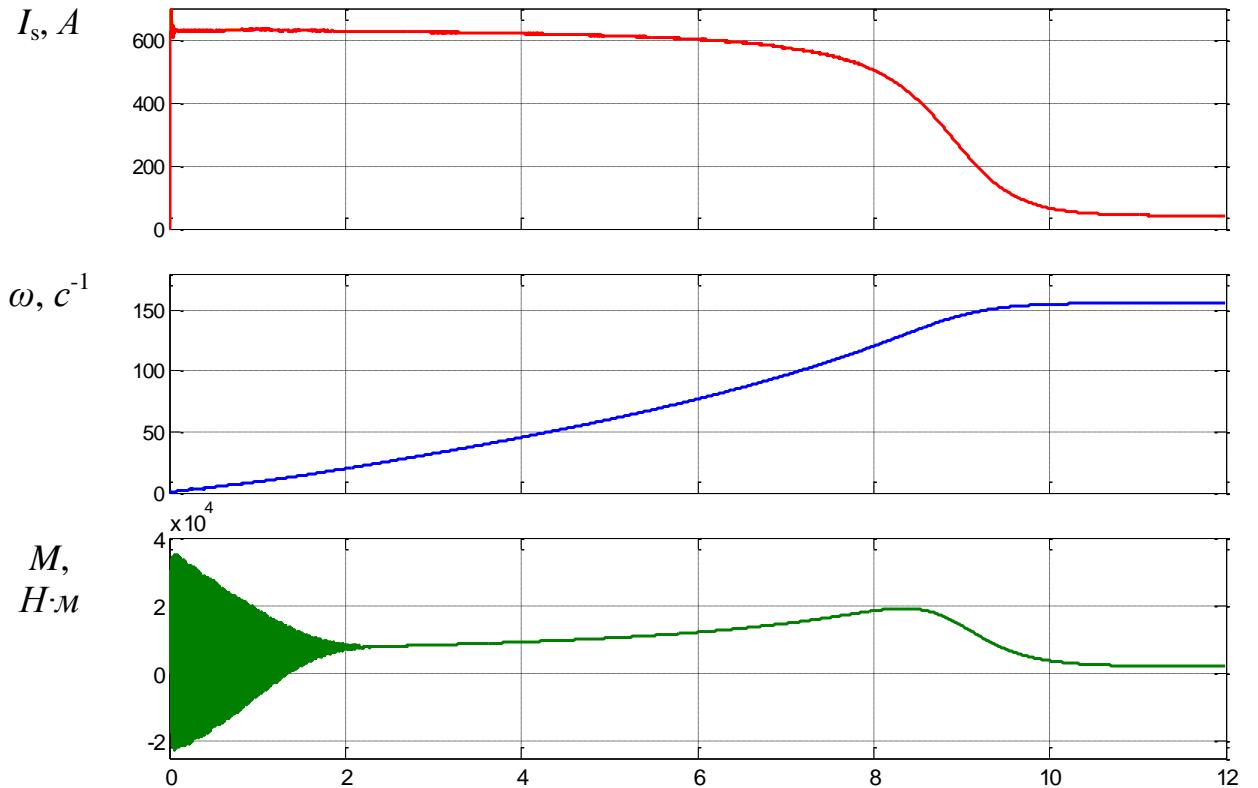


Рисунок 5.13. - Осциллограммы пуска АД с вентиляторной нагрузкой

паспортным данным. Модель с измененными параметрами можно считать адекватной для решения задач пуска, из-за того что, процесс пуска

мощных вентиляторов проходит с ограниченным по величине моментом со- противления.

На рисунке 5.12 представлены действующее значение тока статора $I_s(t)$, скорости и момента двигателя с приложением нагрузки по окончании процесса пуска. Для вентиляторной нагрузки осциллограммы представлены на рисунке 5.13.

Как показали результаты моделирования, величины кратности пускового тока k_i , номинального тока I_n , тока холостого хода I_{xx} , и номинальной скорости ω_n совпадают с паспортными данными в пределах погрешности $\pm 5\%$. Значение времени пуска t_p совпадает с экспериментальным.

5.5.5. Разработка модели трансформаторно-тиристорного пускового устройства

Пусковое устройство имеет три основных элемента, это - трансформатор, первичная обмотка включена в статорную цепь асинхронного двигателя, тиристорный преобразователь напряжения (ТПН), являющийся нагрузкой вторичной обмотки трансформатора и система управления им.

Трансформатора в модели реализуется библиотечным блоком «*Zigzag Phase-Shifting Transformer*». В этом блоке учитывается насыщение сердечника, задавая в настройках вид и характер кривой намагничивания. В зависимости от исследуемой схемы вторичные обмотки трансформатора соединяются либо звездой, либо звездой с нейтралью или треугольником.

Выполнение тиристорного регулятора напряжения может быть различным как по схемным решениям, так и по способу управления вторичной обмотки трансформатора. Мы рассматривали ТПН, который был приведен на рисунке 5.4. - ТПН состоит из тиристоров включенных встречно-параллельно, дополненных токоограничивающими резисторами (рисунок 5.14).

Характеристики реального тиристора отражает библиотечный элемент «*Detailed Thyristor*», который и использовался при разработке модели.

Для управления тиристорами был смоделирован субблок «*Control_tir*» с применением элементов *Simulink* (рисунок 5.15), в котором реализуется вертикальный принцип управления тиристорным блоком. На входы «*a*» «*b*» и «*c*» этого блока подключается вторичная обмотка трансформатора. Вход «*alfa_deg*» обеспечивает задание угла управления тиристорами α в градусах. Для дальнейших исследований предусмотрено либо вводить постоянное значение угла управления α блоком «*Constant*», либо, есть возможность, задавать закон изменения $\alpha(t)$ блоком «*Fcn*».

Разработанная модель позволяет использовать и мостовой управляемый выпрямитель из библиотечного блока «*Universal Bridge*», управление которым в составе библиотеки имеется.

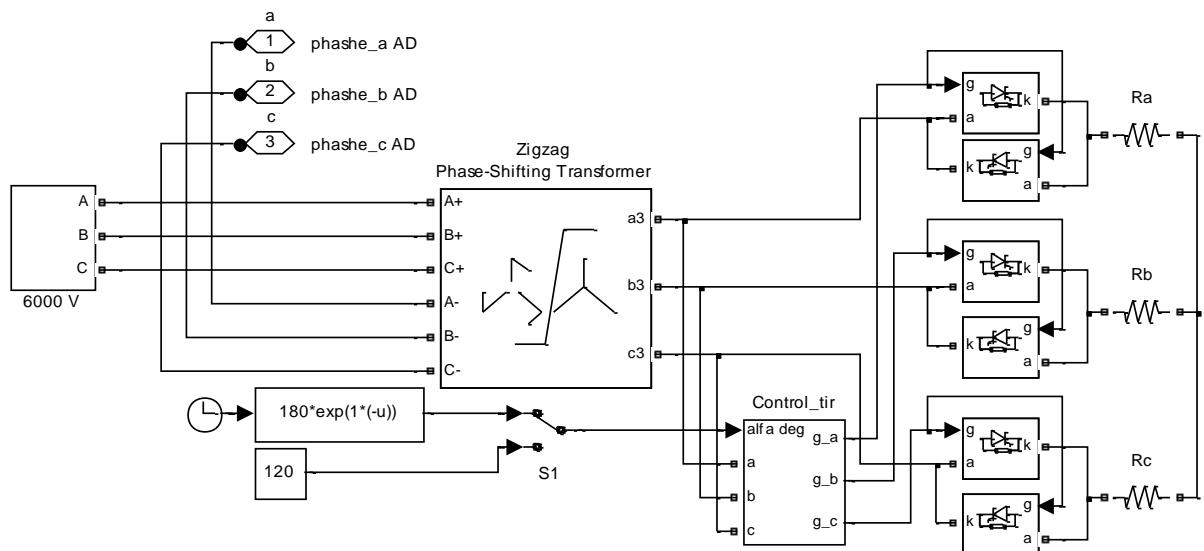


Рисунок 5.14. - Модель трансформатора с ТПН разрабатываемого устройства

Следует отметить, что прежде, чем включать тот или иной компонент в модель пускового устройства, его исследовали на адекватность представления результатов моделирования. Для каждого из элементов пускового устройства предлагаются тестирующие модели, определяющие его работоспособность. На рисунке 5.16 представлена модель, оценивающая работу системы

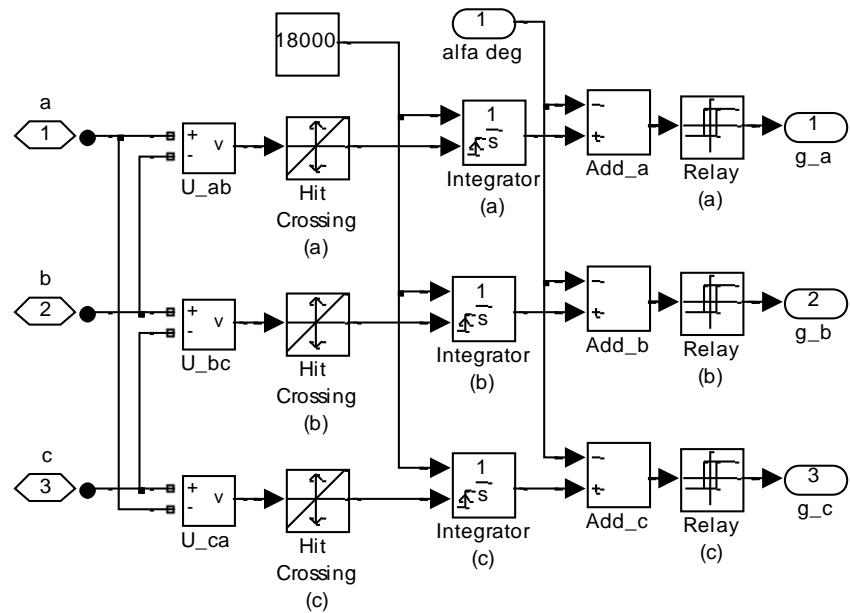


Рисунок 5.15. - Структура блока управления тиристорами

управления, если ТПН включен по схеме с нулевым проводом. На схеме данный преобразователь показан субблоком «*Tir_regulyator*». Для моделирования приняли, что угол управления α изменяется по линейному закону от 180° до 0° . Исследования проводились при следующих допущениях: нагрузка - активное сопротивление, блок питается от идеального источника ЭДС.

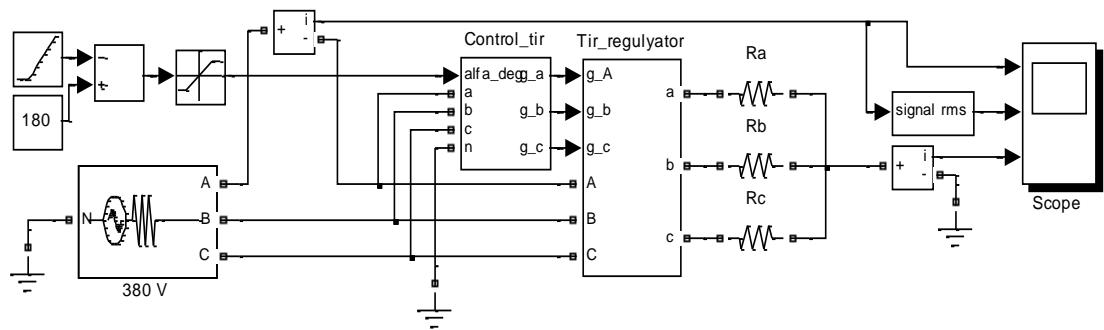


Рисунок 5.16. - Схема модели для исследования ТПН

Кривые изменений мгновенного значения и величины действующего фазного тока, когда линейно увеличиваем угол α , и мгновенного значения тока нейтрального провода от времени представлены на рисунке 5.17. По полученным результатам можно судить, что модель адекватно отражает работу ТПН в таком режиме работы [35].

Также проверялась модель тиристоров и совместная их работа при встречно-параллельном включении и отдельно работа трансформатора.

Итогом исследования отдельных блоков трансформаторно-тиристорного пускового устройства явилась модель, представленная на рисунке 5.18. Для получения информации о координатах двигателя, таких как: ток статора, скорость, момент и напряжение, а также величинах токов и напряжения вторичной обмотки трансформатора, в модель включены измерительные приборы и осциллографы.

Трансформатор для пускового устройства выбирался из ряда силовых выпускаемых промышленно устройств. Выше отмечалось, что оптимальным является использование трансформатора на напряжение в 2-3 раза меньше, чем напряжение сети и номинальной мощности достаточной, чтобы ток во вторичной обмотке за время пуска, не превысил номинальный. Исследования на модели позволили сделать вывод, что если мощность трансформатора равна мощности двигателя при напряжении питания в половину мень-

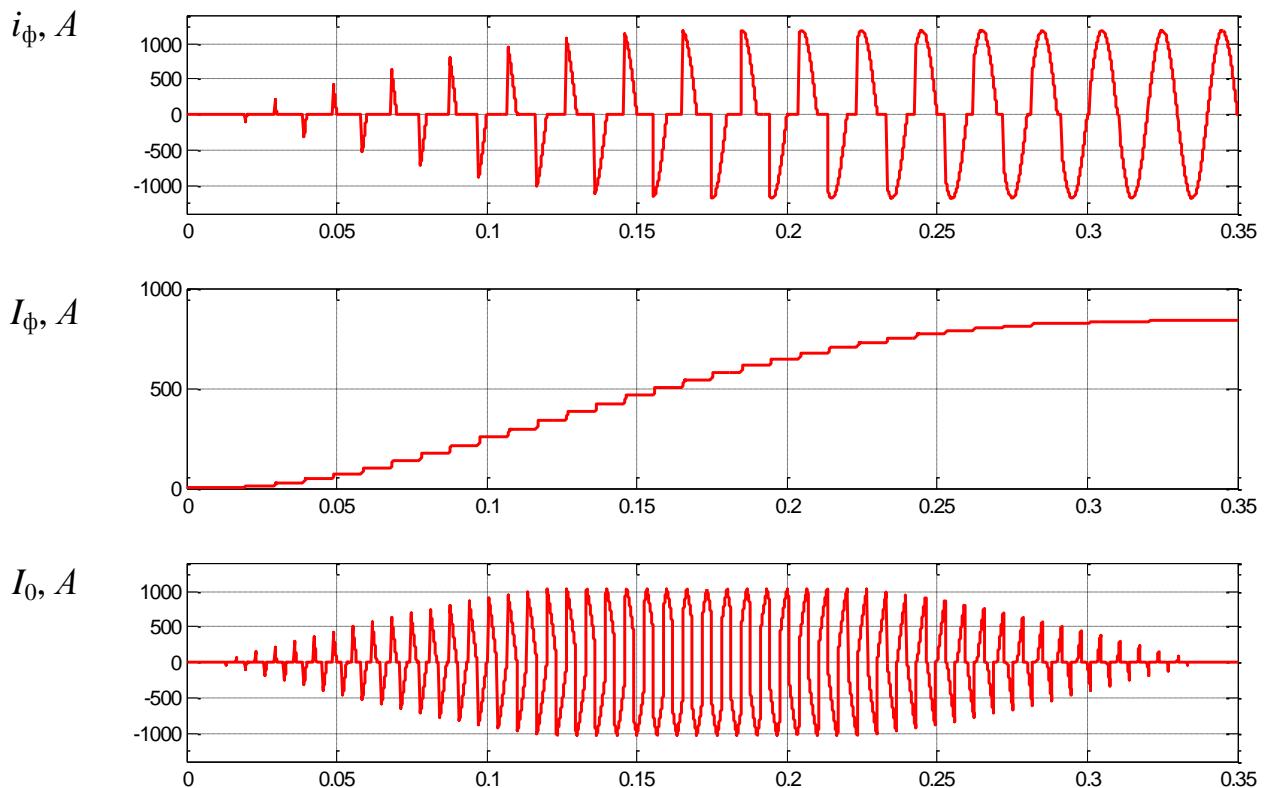


Рисунок 5.17. - Результаты моделирования работы ТПН

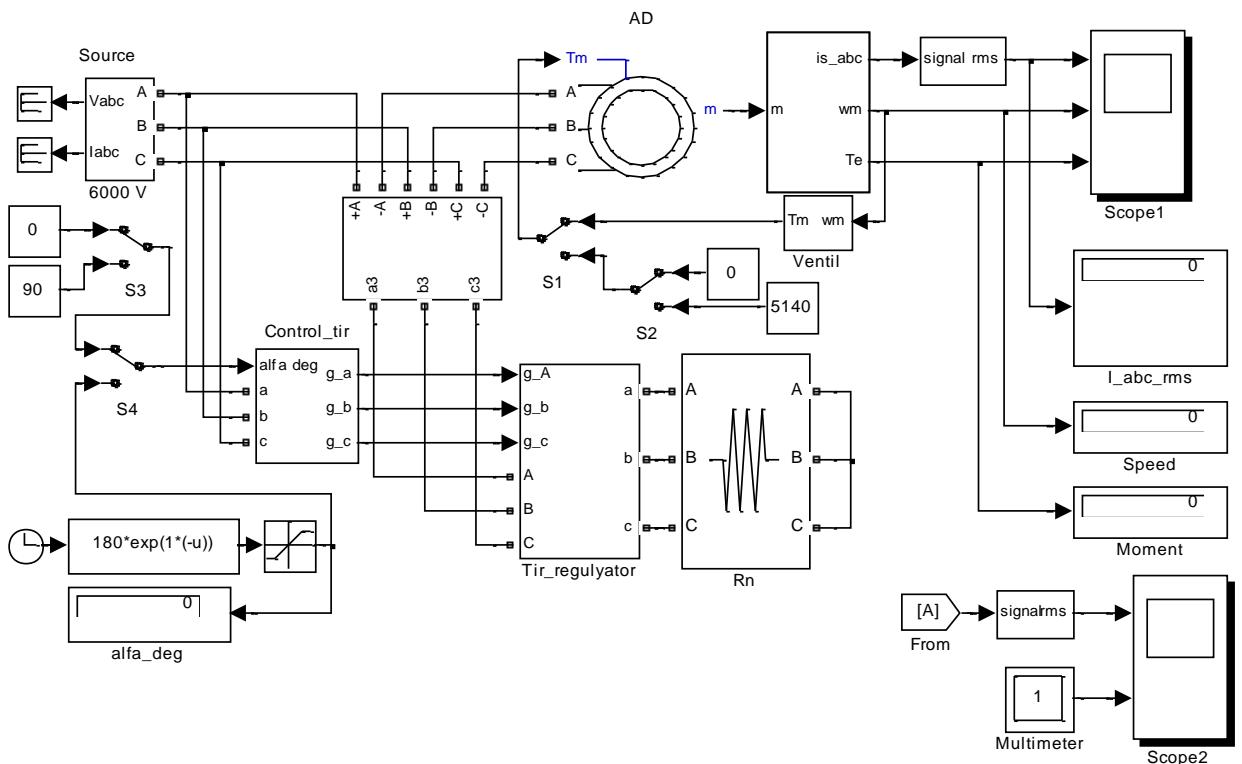


Рисунок 5.18. - Структурная схема разработанной модели трансформаторно-тиристорного пускового устройства АД

Исходя из этих соображений, для исследования пускового устройства выбран масляный трансформатор ТМ3 ($S_n=630 \text{ кВА}$, $U_1=3 \text{ кВ}$) технические характеристики которого приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5- Паспортные данные трансформатора ТМ3

$S, \text{ кВА}$	$U_1, \text{ В}$	$U_2, \text{ В}$	$P_{xx}, \text{ Вт}$	$I_{xx}, \%$	$P_{кз}, \text{ Вт}$	$U_{кз}, \%$
630	3000	400	1050	1,8	7600	5,5

5.6. Исследование управляемого пуска асинхронного двигателя

Любое пусковое устройство для асинхронных двигателей должно обеспечивать снижение пускового тока и момента, который при пуске знакопеременен. Для механизмов с вентиляторной нагрузкой время пуска не ограничивается, но при этом увеличиваются тепловые потери, и, как следствие, увели-

чивается износ изоляции[94]. Время пуска должно быть минимальным с точки зрения уменьшения потерь и повышения ресурсоэффективности.

Исследования предлагаемого пускового устройства должны ответить на вопросы: каковы кратности пусковых токов; как снижается амплитуда момента при пуске; какова длительность процесса пуска t_p ; возможен ли управляемый пуск?

Исследуем процесс пуска двигателя в режиме холостого хода. Представленные на рисунке 5.19 графики, показывают пуск асинхронного двигателя с ограничением напряжения питания. Из приведенных кривых следует, что при постоянном угле α при росте скорости наблюдается снижение тока статора. Характер изменения кривой $U_s(t)$ при этом, до определенного момента такой же, как и у тока статора $I_s(t)$. После разгона двигателя до скорости вращения равной номинальному значению, напряжение на нем возрастает до напряжения питания. Следовательно, можно говорить о том, что при постоянном значении угла управления α напряжение на двигателе не является постоянной величиной, а является функцией тока статора.

В этом и есть отличие трансформаторно-тиристорного пускового устройства от известных пусковых устройств на базе ТРН.

Кривые изменения в токе вторичной обмотки и напряжения в первичной обмотке трансформатора представлены на рисунке 5.20, зафиксированные в том же эксперименте, что и предыдущие кривые. Можно увидеть, что ток вторичной обмотки трансформатора по характеру изменения идентичен фазному току двигателя.

Для других углов управления в диапазоне $0\dots180^\circ$ получены аналогичные кривые. Их характер и вид идентичен приведенным для угла управления $\alpha=110^\circ$. При этом фиксировались значения кратности пускового тока k_i и времени пуска t_p .

По этим значениям построены характеристики изменения времени пуска (ось y) и кратности пускового тока (вспомогательная ось y) от угла управления α , представленные на рисунке 5.21.

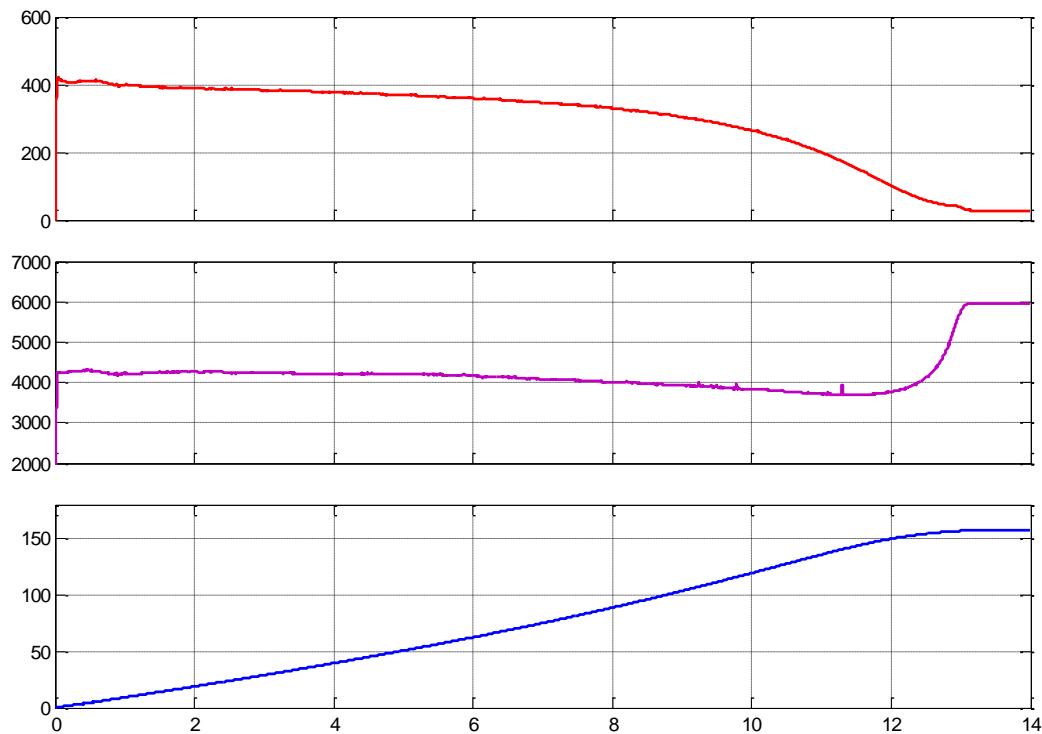


Рисунок 5.19. - Пуск двигателя при постоянном угле управления $\alpha=110^\circ$

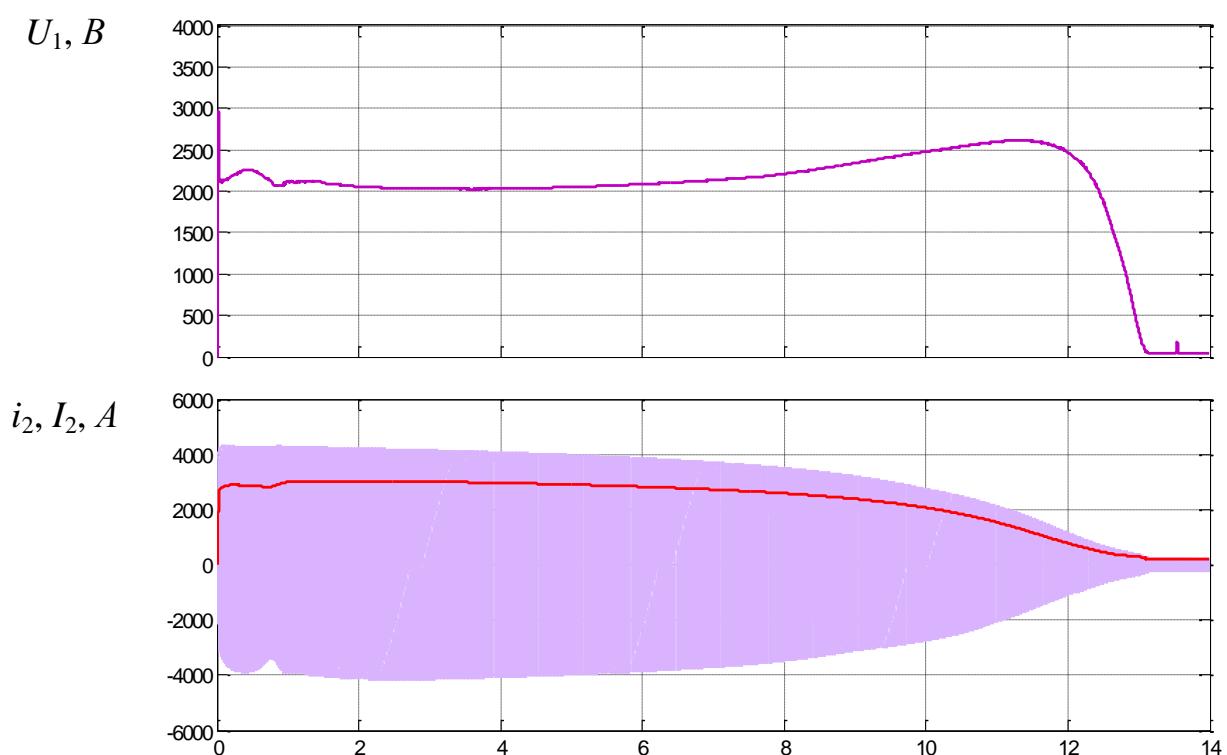


Рисунок 5.20. - Изменения напряжения на первичной обмотке и ток во вторичной обмотке трансформатора при пуске двигателя с углом управления $\alpha=110^\circ$

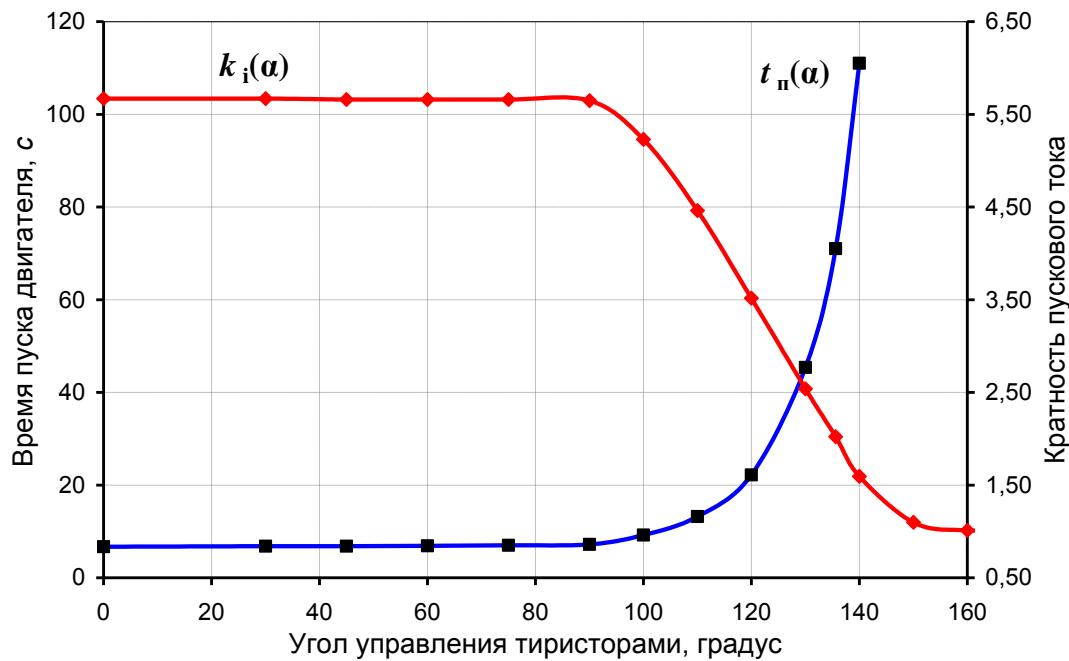


Рисунок 5.21. - Зависимости $k_i(\alpha)$, $t_n(\alpha)$ в режиме холостого хода двигателя

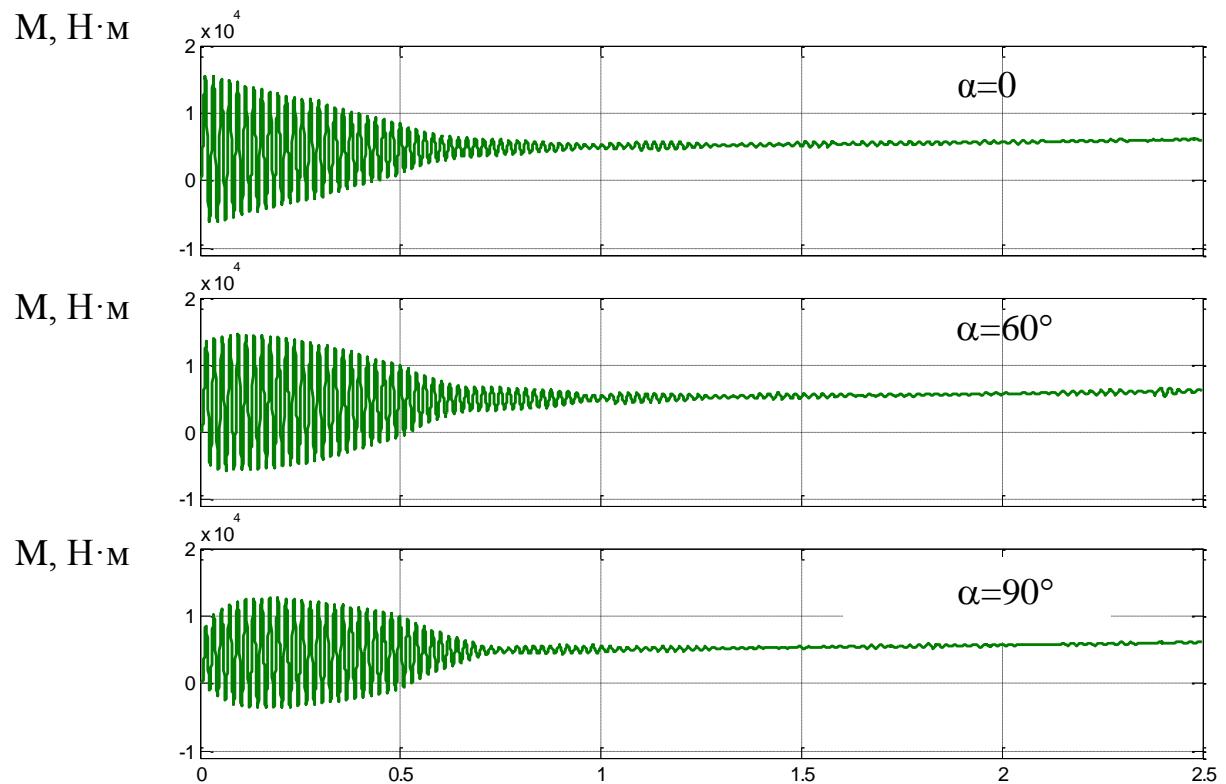


Рисунок 5.22. - Зависимости пускового момента двигателя от времени при углах управления 0 , 60° и 90°

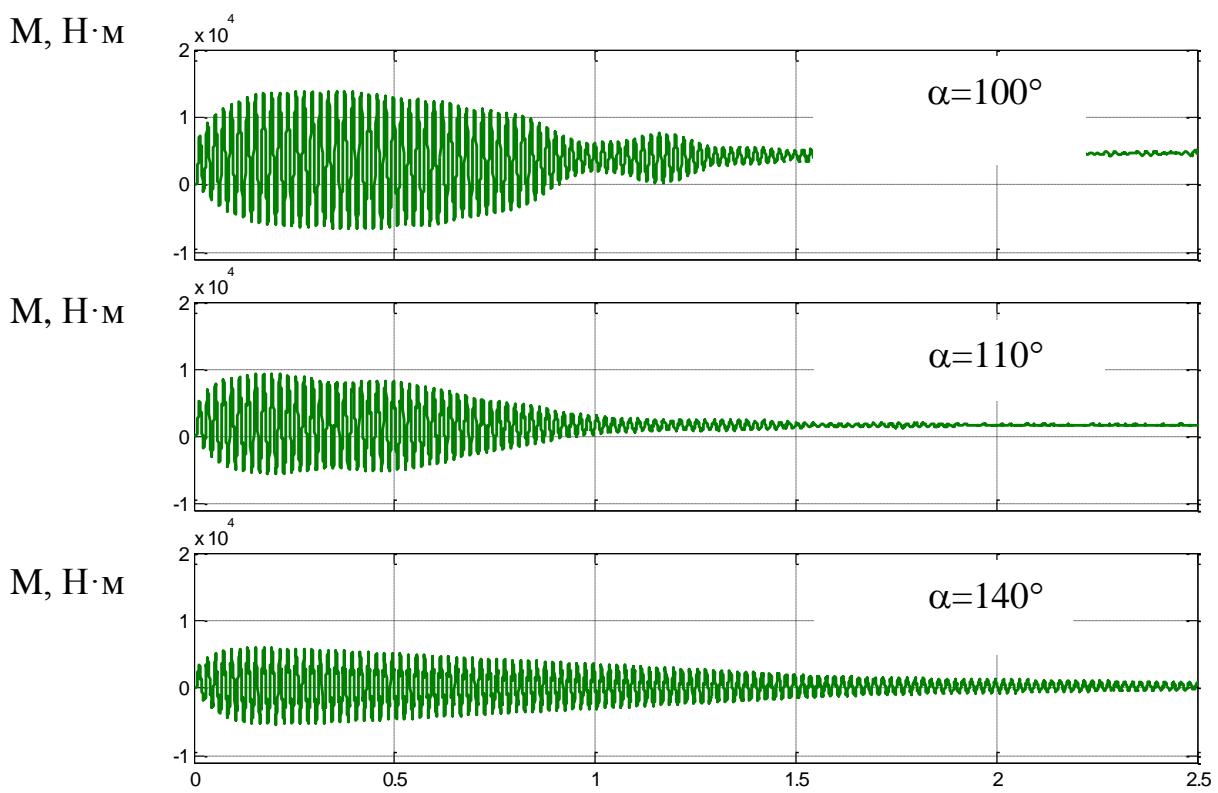


Рисунок 5.23. - Зависимости пускового момента двигателя от времени при углах управления $100^\circ, 110^\circ, 140^\circ$

Как видно из графиков, изменение угла управления α от 0 до 90° не влияет на величину кратности пускового тока, но при этом происходит уменьшение в $1,5\dots2,5$ раз пускового момента (представленных на рисунке 5.22, 5.23) по сравнению моментом при прямом пуске. При увеличении угла выше 150° величина пускового момента не изменяется.

Таким образом, предлагаемое пусковое устройство позволяет снизить у двигателя пусковой ток и величину ударного момента.

Как известно, при пуске в режиме холостого хода время не является критической величиной, так как величина потерь не зависит от времени пуска t_p .

При выборе тиристоров для пускового устройства мы должны определить максимальное значение тока вторичной обмотки трансформатора. Максимальное значение ток принимает при $\alpha=0^\circ$. Рассчитанные кривые изменения величин фазных токов (мгновенные и действующие значения) в фазе вторичной обмотки трансформатора приведены на рисунке 5.24.

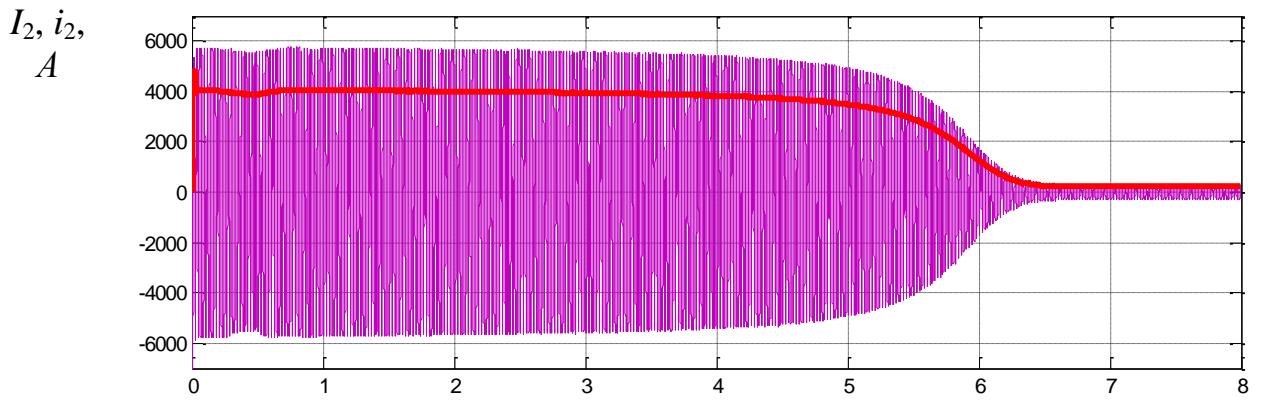


Рисунок 5.24. - Изменения в токе вторичной обмотки трансформатора при угле управления $\alpha=0^\circ$

Максимальное значение амплитуды тока 5800 A, это видно из графиков, а это достаточно большое значение для тиристорного регулятора напряжения.

5.6.1. Исследования влияния вида нагрузки на пуск двигателя

Как известно, вентиляторная нагрузка определяется квадратичной зависимостью момента сопротивления от текущей скорости двигателя [41]. Эта зависимость применима для вентиляторов, работающих на сеть без противодавления:

$$M = M_{xx} + k\omega^2,$$

где M_{xx} – момент холостого хода механизма;

k – коэффициент пропорциональности.

Такая формула применима и для вентиляторов, пускаемых в ход при закрытой заслонке. На номинальной скорости момент сопротивления не превысит $0,4M_{\text{ном}}$. Так как, для примера, пуск вентиляторов ВВН-20 всегда осуществляется при закрытой ОНА. В дальнейших исследованиях под вентиляторной нагрузкой будем понимать нагрузку с максимальным моментом равным $0,4M_{\text{ном}}$. При этом значение момента холостого хода $M_{xx} \approx 50 \text{ H}\cdot\text{m}$ и коэффициент пропорциональности равен 0,081.

Пониженная частота вращения возможна после пуска двигателя, но при пониженном напряжении и вентиляторной нагрузкой на валу. Ток обмо-

ток статора из-за повышенного скольжения при этом становится больше номинального.

Исследования на модели показали возникновение таких режимов, которые устанавливаются при постоянных углах управления превышающих 90° . Можно наблюдать, что этот процесс отличается от пуска на

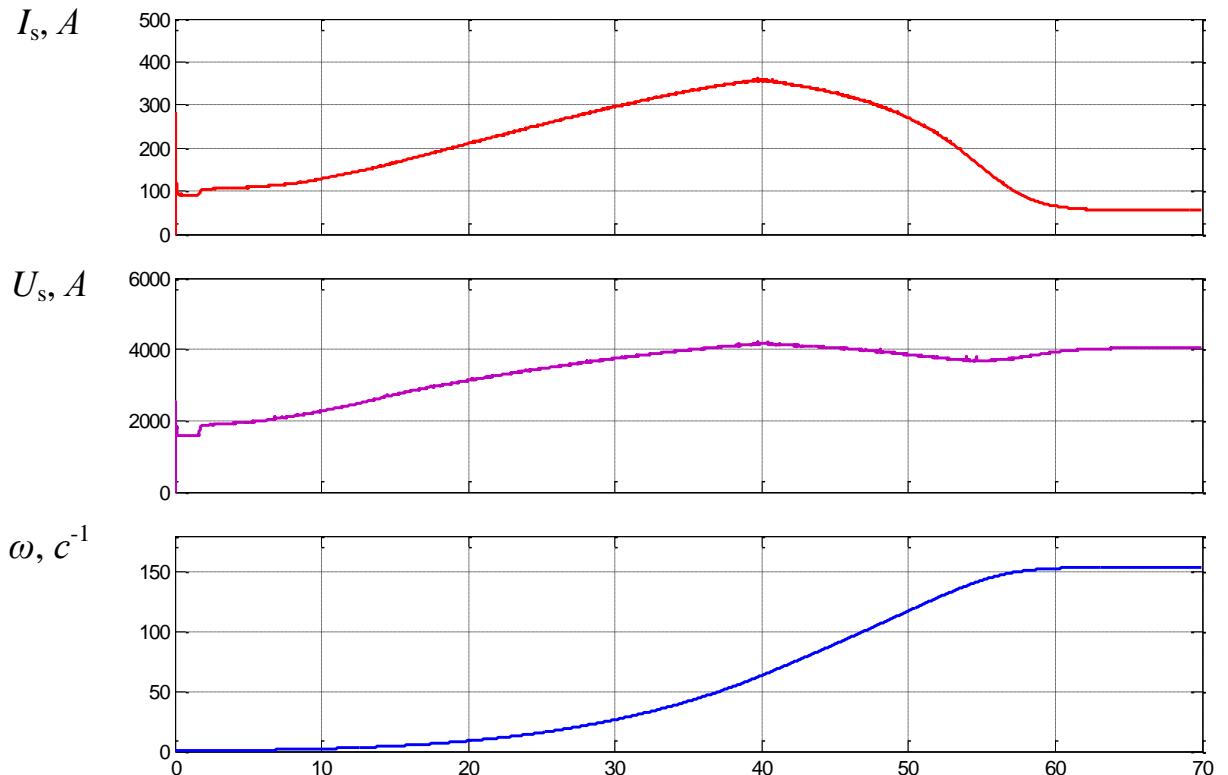


Рисунок 5.25. - Пуск двигателя с неполным напряжением на статорной обмотке после его окончания

холостом ходу с постоянным углом управления тем, что напряжение на двигателе не может достигнуть номинального значения. Также обстоит дело и при управляемом пуске, если заведомо изменять угол управления рисунок 5.25. Для предотвращения подобного явления, мы предлагаем применить управляемый пуск двигателя по алгоритмам, обеспечивающим выход на номинальную скорость вращения.

Для этого необходимо реализовать управляемый пуск асинхронного двигателя, изменяя угол управления α по закону, который позволяет, и ограничить пусковой ток и ударный момент, и обеспечить увеличение подводимого напряжения к двигателю по окончании процесса пуска. Такая система

управления может быть реализована с использованием обратных связей по координатам двигателя или по току, или по напряжению или моменту.

У ведущих фирм-производителей пусковых устройств пусковой ток ограничен величиной не превышающей $4I_{\text{ном}}$. Соблюдение такого условия позволяет снизить влияние на сеть. При изменении угла управления по линейному или экспоненциальному закону, соблюдение этого условия приводит к увеличению пускового процесса, приводящего к возрастанию потерь энергии и ухудшению теплового режима обмоток двигателя.

Снижение этих потерь можно получить, осуществляя управляемый пуск, минимизируя время пуска. Это достигается, если на начальном этапе ограничивать пусковой ток на величине $(1,5-2) \cdot I_{\text{ном}}$, с последующим его увеличением до значения $4I_{\text{ном}}$ и дальнейшим удержанием этого значения до окончания процесса пуска. Для реализации этого положения необходимо, чтобы в момент пуска значение угла α принимало значения $135\dots150^\circ$ (по рисунку 5.14). Затем угол быстро уменьшаем до величины $110\dots115^\circ$, что будет соответствовать значению четырехкратного пускового тока. При достижении двигателем скорости $(0,6-0,7)\omega_n$ угол уменьшаем до нуля, что позволяет выйти на номинальное напряжение питания на статорных обмотках по окончании процесса пуска.

Приведенный алгоритм пуска приводит к снижению влияния ударного момента на механическую часть электропривода и минимизации нагрева обмоток при пуске, а также снижает влияние на сеть процесса пуска мощного высоковольтного электродвигателя.

Теоретические исследования позволяют сделать вывод о том, что трансформаторно-тиристорное пусковое устройство эффективно может быть использовано для пуска высоковольтных асинхронных электроприводов с вентиляторным характером нагрузки.

5.7. Экспериментальные исследования системы трансформаторно-тиристорное пусковое устройство- асинхронный двигатель

Характеристики трансформатора определяют характеристики пускового устройства. Поэтому целесообразно провести исследования, позволяющие выбрать трансформатор пускового устройства.

Исследования проводились в электроремонтной мастерской цеха подготовки аглошихты ГОП ООО «ММК», где в качестве трансформатора для пускового устройства применялся трансформатор ТСЗИ-1,6. Выбор двигателей осуществлялся по методам планирования эксперимента. Были выбраны двигатели типа 4А с синхронной частотой вращения 1500 об/мин, имеющие номинальную мощность как меньшую, так и большую, чем номинальная мощность пускового трансформатора.

Таблица 5.6 - Характеристики пуска двигателей с трансформатором ТСЗИ-1,6

$P_d, \text{ кВт}$	$I_{n\max}, A$	$t_n, \text{ с}$	$I_{n\min}, A$	$T_{n\min}, \text{ с}$	$u_{\partial\theta}, B$
0,6	7,5	0,07	5,7	0,1	300
1,5	34	0,08	18	0,19	220
2,2	37	0,08	22	0,25	210
5,5	130	0,17	33	0,34	150
7,5	180	0,05	41	0,475	114
11	210	0,09	58	20	80

Исследования процесса пуска с различными двигателями сведены в таблице 5.6. Как можно увидеть из этой таблицы, если увеличивается мощность двигателя, то время пуска также увеличивается, при уменьшении начального напряжения на нем. Для двигателя мощностью 11 кВт, превышение мощности пускового трансформатора почти в 7 раз, разгонялся он более 20 с до номинальной скорости вращения, это по условиям эксплуатации не приемлемо.

Если мощность двигателя меньше мощности трансформатора пусковой ток снижается незначительно. Процесс пуска записывался анализатором качества энергии HIOKI 3197. Результаты, обработанные прикладной програм-

мой, представлены в виде графиков обобщенных векторов пускового тока прямого пуска и с трансформаторным пусковым устройством на рисунке 5.26.

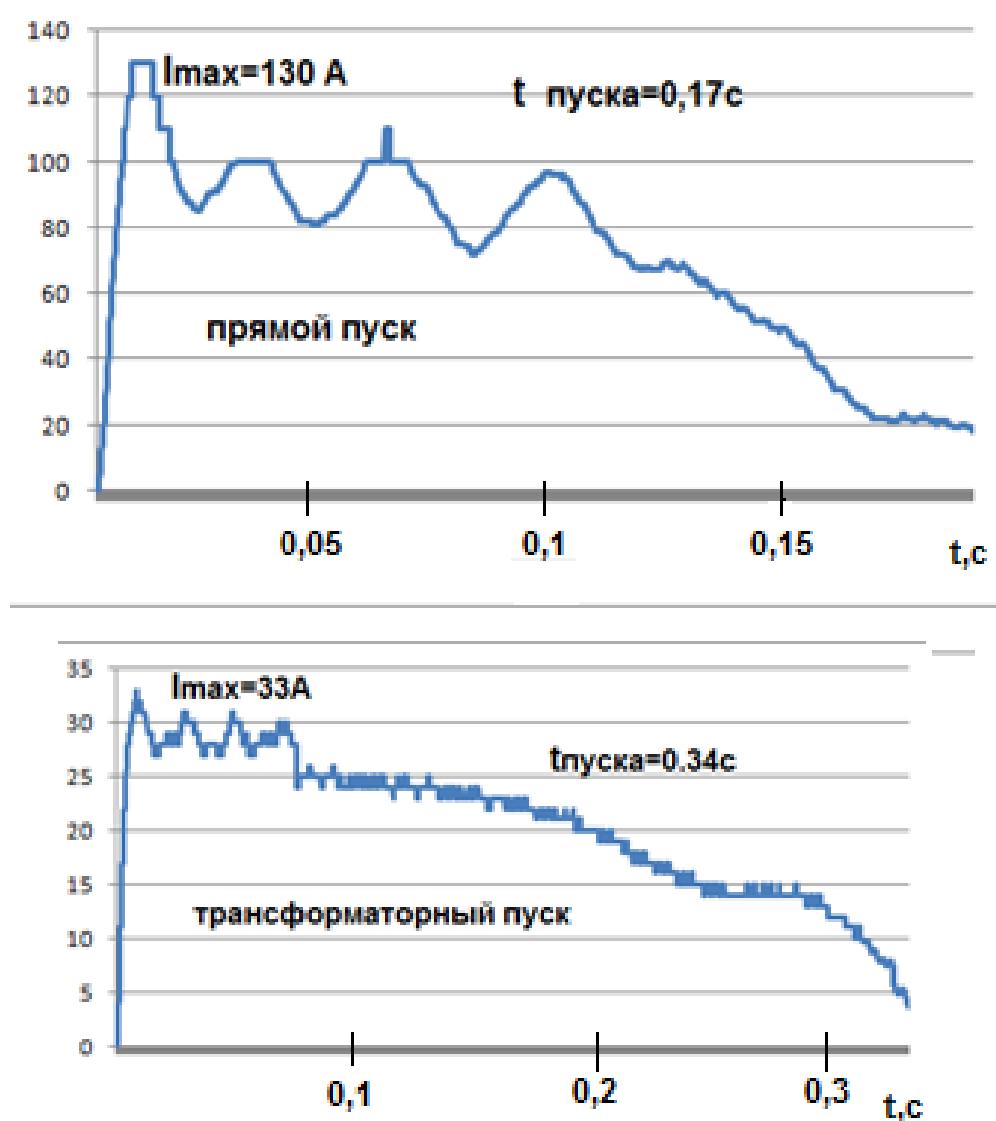


Рисунок 5.26. - Обобщенные вектора пускового тока для двигателя 5,5 кВт

Применяя методы планирования эксперимента, для двигателя насоса типа МО мощностью 45 кВт и двигателя эксгаустера 4А мощностью 132 кВт предлагаются для исследования пусковых режимов трансформаторы типа ТСЗВ-40 и ТСЗ-63, 40 кВт и 63кВт соответственно. Исследования проводились в цехе подготовки аглошихты ГОП ООО «ММК». Результаты сведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7- Пусковые характеристики двигателей

$S, \text{кВт}$	$I_{\max n}, \text{А}$	$t_n, \text{с}$	$I_{\max mmny}, \text{А}$	$t_{mmny}, \text{с}$	$U_o \text{ об}, \text{В}$
45	910	0,375			
тр-р 40			750	0,447	300
тр-р 63			820	0,54	320
132	2200	0,45			
тр-р 40			1000	1,5	190
тр-р 63			1450	1,15	205

По данным таблицы 5.7. построена зависимость (рисунок 5.27) относительного превышения мощности АД к мощности пускового трансформатора Р* от относительного снижения пускового тока асинхронного двигателя I*. Из которого можно сделать вывод о том, что при соизмеримой мощности пускового трансформатора и АД снижение пускового тока практически не происходит, а снижение мощности пускового трансформатора приводит к снижению пускового тока. Так при двухкратном превышении происходит снижение броска тока в 1,5 раза, а при трехкратном – в 2 раза. Дальнейшее снижение установленной мощности возможно при условии использования трансформаторно-тиристорного пускового устройства кратковременного действия.

5.8. Экспериментальные исследования трансформаторного пускового устройства

Для некоторых технологических процессов пуск асинхронного двигателя можно проводить не используя тиристорный блок в цепи вторичной обмотки. Для этого вторичную обмотку трансформатора необходимо закоротить.

В действительности, этот способ является одним из вариантов реакторного пуска, но имеет ряд преимуществ за счет тех электромагнитных процессов, которые происходят в короткозамкнутом трансформаторе.

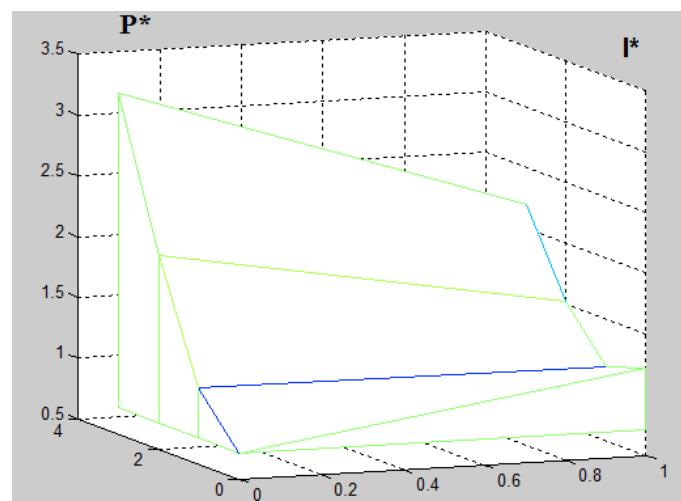


Рисунок 5.27. - Зависимость относительного превышения мощности АД к мощности пускового трансформатора P^* от относительного снижения пускового тока асинхронного двигателя I^*

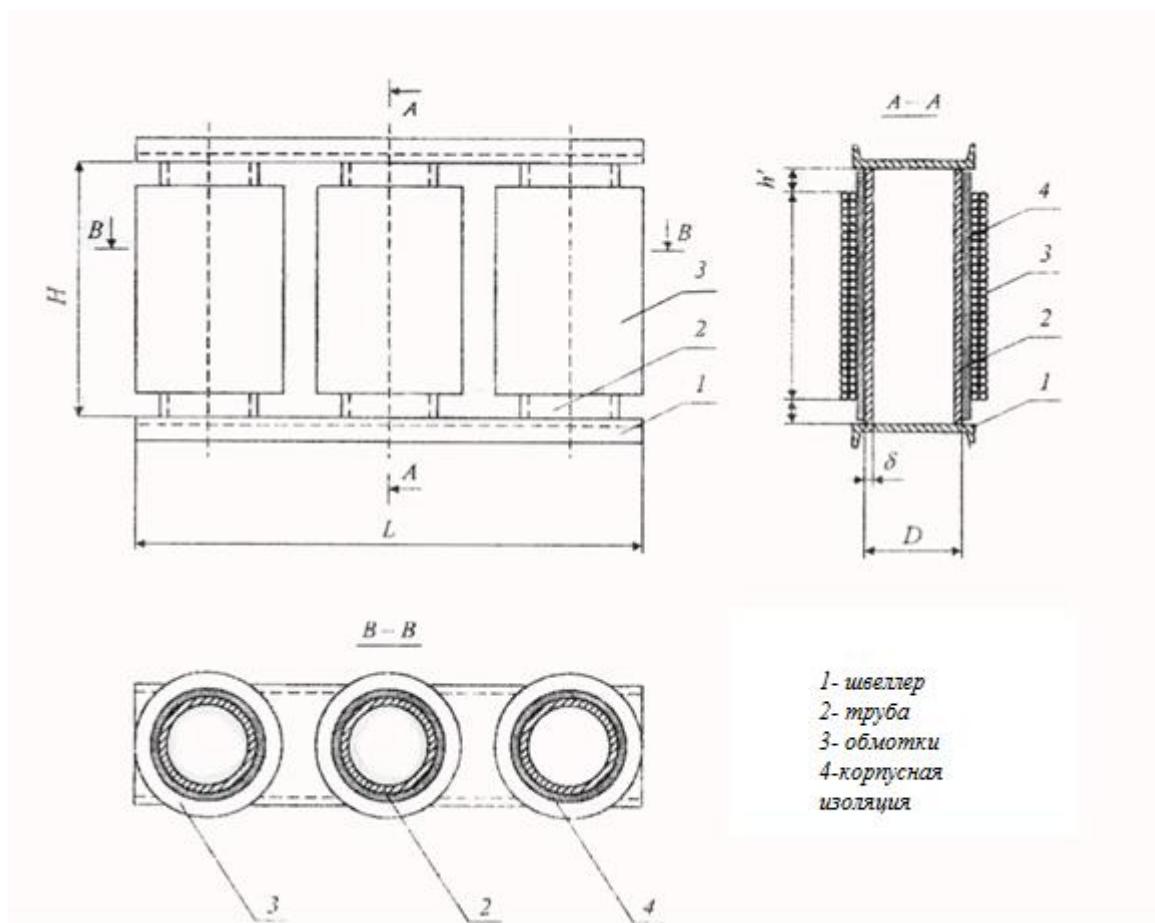


Рисунок 5.28. - Конструкция ПТ

Использование трансформатора из стандартного ряда сопряжено с определенными трудностями и, прежде всего, с тепловыми процессами, происход-

дящими в нем. Поэтому предлагается изготавливать пусковой трансформатор (ПТ) в условиях электроремонтного производства.

Как видно из рисунка 5.28, такой ПТ конструктивно состоит из трех стержней, изготовленных из горячекатаной бесшовной стальной трубы, соединенных между собой металлическим швеллером при помощи электро-сварки [98].

Известно, что катушка, питаемая переменным током, создает в сердечнике, на который она намотана, переменное магнитное поле. Переменный магнитный поток возбуждает в металлическом теле переменную Э.Д.С. Поскольку стальной сердечник представляет собой ферромагнитную среду, характеризующуюся комплексным магнитным сопротивлением, то в этом сердечнике протекают вихревые токи, которые, в конечном итоге, его нагревают. Иначе говоря, поток энергии, проникающий внутрь цилиндрического сердечника через его поверхность, поглощается по мере проникновения в толщу металла, выделяясь в виде тепла.

Величина потока энергии согласно теории индукционного нагрева определяется как:

– активная составляющая, Bm

$$P = \frac{H_0^2 \cdot \rho}{2 \cdot \Delta} \cdot A_u; \quad (5.23)$$

– реактивная составляющая, BAp

$$Q = \frac{H_0^2 \cdot \rho}{2 \cdot \Delta} \cdot B_u, \quad (5.24)$$

где H_0 - напряженность магнитного поля у поверхности сердечника, A/m ;

ρ – удельное магнитное сопротивление стали ($\rho = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$);

Δ – глубина проникновения магнитного потока, m ;

A_u, B_u - выражения, образованные из функций Бесселя, определяемые для сердечника в виде сплошного цилиндра как [100-102].

$$A_u = \sqrt{2} \cdot \frac{\operatorname{ber} \frac{D}{\sqrt{2} \cdot \Delta} \cdot \operatorname{ber}' \frac{D}{\sqrt{2} \cdot \Delta} + \operatorname{bei} \frac{D}{\sqrt{2} \cdot \Delta} \cdot \operatorname{bei}' \frac{D}{\sqrt{2} \cdot \Delta}}{\operatorname{ber}^2 \frac{D}{\sqrt{2} \cdot \Delta} + \operatorname{bei}^2 \frac{D}{\sqrt{2} \cdot \Delta}}; \quad (5.25)$$

$$B_u = \sqrt{2} \cdot \frac{\operatorname{ber} \frac{D}{\sqrt{2} \cdot \Delta} \cdot \operatorname{ber}' \frac{D}{\sqrt{2} \cdot \Delta} - \operatorname{bei} \frac{D}{\sqrt{2} \cdot \Delta} \cdot \operatorname{bei}' \frac{D}{\sqrt{2} \cdot \Delta}}{\operatorname{ber}^2 \frac{D}{\sqrt{2} \cdot \Delta} + \operatorname{bei}^2 \frac{D}{\sqrt{2} \cdot \Delta}}, \quad (5.26)$$

где D – внешний диаметр сердечника, м.

Для полого цилиндра выражения (5.23) и (5.24) при значениях

$$\frac{d}{\sqrt{2} \cdot \Delta} > 7, \quad (5.27)$$

после упрощения и перехода к гиперболическим функциям, можно заменить следующие зависимости [116]:

$$A_u = \frac{(\operatorname{sh} \frac{2 \cdot \delta}{\Delta} + \sin \frac{2 \cdot \delta}{\Delta}) + \frac{1}{4 \cdot \mu^2} \cdot (\frac{d}{\sqrt{2} \cdot \Delta})^2 \cdot (\operatorname{sh} \frac{2 \cdot \delta}{\Delta} - \sin \frac{2 \cdot \delta}{\Delta}) + \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \mu} \cdot (\frac{d}{\sqrt{2} \cdot \Delta}) \cdot (\operatorname{ch} \frac{2 \cdot \delta}{\Delta} + \cos \frac{2 \cdot \delta}{\Delta})}{(\operatorname{ch} \frac{2 \cdot \delta}{\Delta} + \cos \frac{2 \cdot \delta}{\Delta}) + \frac{1}{4 \cdot \mu^2} \cdot (\frac{d}{\sqrt{2} \cdot \Delta})^2 \cdot (\operatorname{ch} \frac{2 \cdot \delta}{\Delta} - \cos \frac{2 \cdot \delta}{\Delta}) + \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \mu} \cdot (\frac{d}{\sqrt{2} \cdot \Delta}) \cdot (\operatorname{sh} \frac{2 \cdot \delta}{\Delta} - \sin \frac{2 \cdot \delta}{\Delta})} \quad (5.28)$$

$$B_u = \frac{(\operatorname{sh} \frac{2 \cdot \delta}{\Delta} - \sin \frac{2 \cdot \delta}{\Delta}) + \frac{1}{4 \cdot \mu^2} \cdot (\frac{d}{\sqrt{2} \cdot \Delta})^2 \cdot (\operatorname{sh} \frac{2 \cdot \delta}{\Delta} + \sin \frac{2 \cdot \delta}{\Delta}) + \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \mu} \cdot (\frac{d}{\sqrt{2} \cdot \Delta}) \cdot (\operatorname{ch} \frac{2 \cdot \delta}{\Delta} - \cos \frac{2 \cdot \delta}{\Delta})}{(\operatorname{ch} \frac{2 \cdot \delta}{\Delta} + \cos \frac{2 \cdot \delta}{\Delta}) + \frac{1}{4 \cdot \mu^2} \cdot (\frac{d}{\sqrt{2} \cdot \Delta})^2 \cdot (\operatorname{ch} \frac{2 \cdot \delta}{\Delta} - \cos \frac{2 \cdot \delta}{\Delta}) + \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \mu} \cdot (\frac{d}{\sqrt{2} \cdot \Delta}) \cdot (\operatorname{sh} \frac{2 \cdot \delta}{\Delta} - \sin \frac{2 \cdot \delta}{\Delta})} \quad (5.29)$$

где d – внутренний диаметр полого цилиндра, м;

δ – толщина стенки стержня ПТ, м;

μ – относительная магнитная проницаемость (для горячекатаной стали $\mu = 64$).

Учитывая, что напряженность магнитного поля у поверхности сердечника находится как:

$$H_0 = I_{up \max} \cdot w_{up}^* = \sqrt{2} \cdot I_{up} \cdot w_{up}^*, \quad (5.30)$$

где $I_{up \max}$ – амплитуда тока в пусковом трансформаторе, A ;

I_{up} – действующее значение тока, A ;

w_{up}^* – число витков обмотки на 1 м боковой поверхности цилиндра, выражения (5.23) и (5.24) можно переписать в виде:

$$P = \frac{I_{up}^2 \cdot w_{up}^{*2} \cdot \rho}{\Delta} \cdot A_u, \quad (5.31)$$

$$Q = \frac{I_{up}^2 \cdot w_{up}^{*2} \cdot \rho}{\Delta} \cdot B_u. \quad (5.32)$$

Мощность, выделяющаяся в металлическом цилиндре длиной h , определяется согласно (5.30) в виде:

$$P_{up} = P \cdot A_u \cdot \pi \cdot D \cdot h = \frac{I_{up}^2 \cdot w_{up}^{*2} \cdot \rho}{\Delta} \cdot \pi \cdot D \cdot h \cdot A_u, \quad (5.33)$$

или при напряженности магнитного поля равной 15000 А/м

$$P_{up} = \frac{2,25 \cdot 10^8 \cdot \rho}{\Delta} \cdot \pi \cdot D \cdot h \cdot A_u. \quad (5.34)$$

При разгоне двигателя частота тока в статоре не изменяется $f_1 = 50 \text{ Гц}$.

Глубина проникновения магнитного потока в толщу стержня увеличивается в соответствии с выражением [56, 138]:

$$\Delta = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}}. \quad (5.35)$$

При подстановке (5.35) в (5.34) получим зависимость:

$$P_{up} = \frac{2,25 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{\mu \cdot \rho \cdot f}}{503} \cdot \pi \cdot D \cdot h \cdot A_u, \quad (5.36)$$

из которой следует, что мощность, выделяемая в одном стержне ПТ, при условии достаточности толщины стенки, зависит от частоты тока.

В начале пуска (момент трогания) глубина проникновения составит:

$$\Delta = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f_1}} = 503 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-7}}{64 \cdot 50}} = 0,004 \text{ м} = 4 \text{ мм}, \quad (5.37)$$

при этом согласно (5.28) параметр $A_u \approx 1$, а выражение (5.34) примет вид:

$$P_{up} = 3,5 \cdot 10^4 \cdot D \cdot h. \quad (5.38)$$

Приняв мощность стержня ПТ равной:

$$P_{up} = \frac{1}{3} \cdot U_{2nom} \cdot I_{2nom}, \quad (5.39)$$

где U_{2nom} , I_{2nom} – начальное значения напряжения (B) и среднеквадратичное значение тока статора (A) соответственно, а также учитя конструктивный коэффициент:

$$K = \frac{h}{D} = 3\dots5, \quad (5.40)$$

получим выражения для расчета диаметра и высоты стержня ПТ, m :

$$D = \sqrt{\frac{U_{2nom} \cdot I_{2nom}}{10^5 \cdot K}}, \quad (5.41)$$

$$h = K \cdot D. \quad (5.42)$$

Согласно выражения (5.30), при выбранной напряженности магнитного поля $15000 A/m$, число витков катушки ПТ составит:

$$w_{up} = w_{up}^* \cdot h = \frac{H_0 \cdot h}{\sqrt{2} \cdot I_{up}} = 1,06 \cdot 10^4 \frac{h}{I_{up}}. \quad (5.43)$$

Для расчета механических и электромеханических характеристик необходимо знать величины активного и реактивного сопротивлений ПТ.

Известно, что активная и реактивная мощности могут быть выражены через ток и сопротивление по формулам:

$$P_{up} = I_{up}^2 \cdot R_{up}, \quad (5.44)$$

$$Q_{up} = I_{up}^2 \cdot X_{up},. \quad (5.45)$$

Полное активное сопротивление ПТ складывается из сопротивления катушки постоянному току R_0 и сопротивлению катушки переменному току R_{var} , Om :

$$R_{up} = R_0 + R_{var}. \quad (5.46)$$

Пренебрегая малой величиной сопротивления катушки постоянному току, равной:

$$R_0 = \rho_m \cdot l,, \quad (5.47)$$

где ρ_m – удельное электрическое сопротивление меди, Om/m ;

l – длина катушки, м,

с учетом:

$$w_{up}^* = \frac{w_{up}}{h}. \quad (5.48)$$

Согласно (5.33) и (5.35) получим:

$$R_{up} = R_{var} = \frac{(w_{up}/h)^2 \cdot \rho}{\Delta} \cdot \pi \cdot D \cdot h \cdot A_u. \quad (5.49)$$

При подстановке (5.36) в (5.49) с учетом ранее принятых величин μ и ρ получим:

$$R_{up} = 2,23 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{D}{h} \cdot w_{up}^2 \cdot \sqrt{f} \cdot A_u. \quad (5.50)$$

Аналогичным образом, с учетом (5.31), (5.44) и (5.50) можно записать выражения для реактивного сопротивления ПТ:

$$X_{up} = 1,58 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{D}{h} \cdot w_{up}^2 \cdot \sqrt{f} \cdot B_u. \quad (5.51)$$

Для примера приведем расчет пускового трансформатора для двигателя эксаустера 4А250М6У3 55кВт. Как следует из вышеизложенного, в первую очередь, необходимо определиться: какова будет величина среднеквадратичного тока в момент пуска и величина первоначального напряжения приложенного к пускаемому двигателю. Зададим эти величины 200А и 150В. По формулам (5.41) и (5.42) определяем диаметр и высоту стержня ПТ – это 19мм и 770мм соответственно. Определяется число витков первичной обмотки по формуле (5.43) – 41, задавая коэффициент трансформации равным 2, получаем число витков вторичной обмотки – 20.

Для проверки данной методики был изготовлен трансформатор (рисунок 5.29). Он установлен в машинном зале ЦПАШ ГОП ОАО «ММК» и подключен к двигателю вентилятора мощностью 132 кВт. Процесс прямого пуска вентилятора и пуска с ПТ представлен на рисунке 5.30. Как видно из рисунка пусковой ток уменьшается на 22 %, но время пуска увеличено в 1,4 раза.



Рисунок 5.29. - Внешний вид ПТ

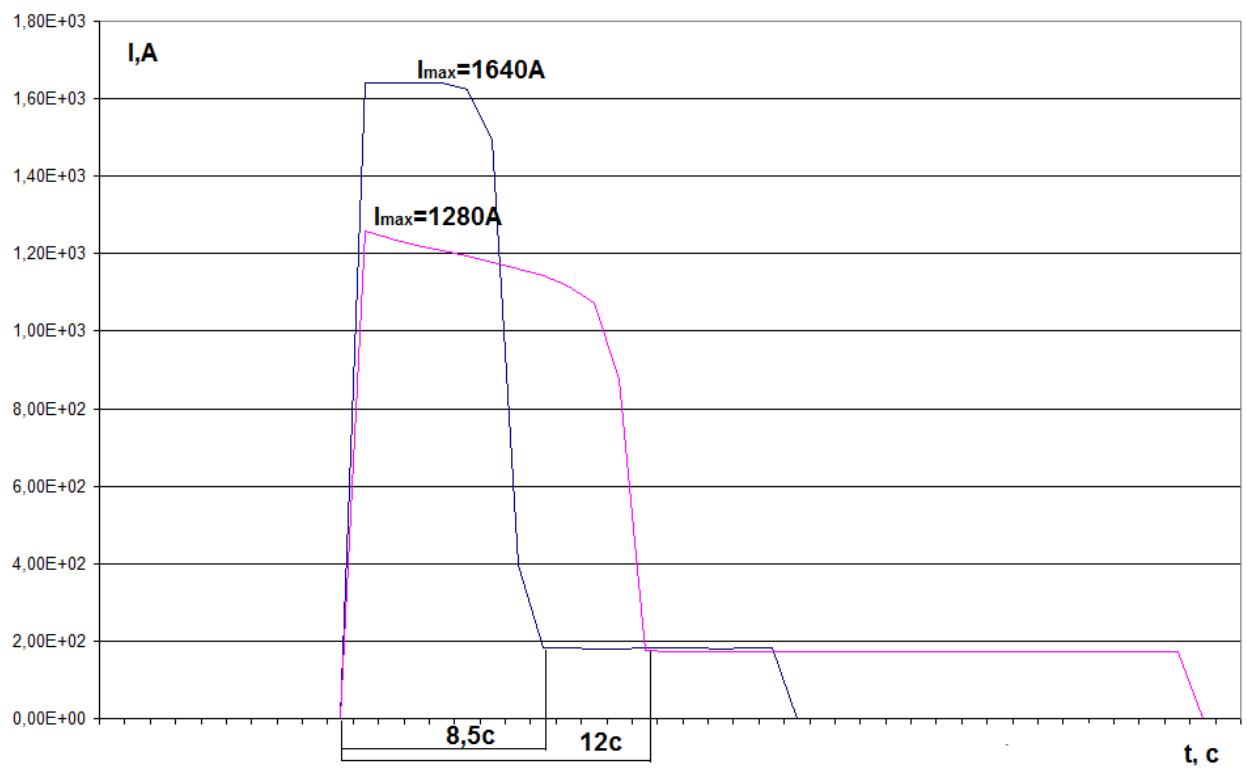


Рисунок 5.30. - Ток двигателя вентилятора при прямом пуске и с ПТ

Предложенные трансформаторно-тиристорные пусковые устройства позволяют осуществлять управляемый пуск асинхронных двигателей. Такое пусковое устройство дает возможность плавно увеличивать напряжение, которое подводится к статорным обмоткам двигателя. Одним из вариантов реа-

лизации ПУ является использование трансформаторного пускового устройства. Стоимость предложенного трансформаторного пускового устройства не превысит 10 тыс. руб., что во много раз дешевле аналогичных пусковых устройств ведущих отечественных фирм. При этом повышается: надежность механической части (снижаются ударные нагрузки в механических передачах), что повышает сроки эксплуатации механического оборудования (редуктора и др.) в 2-4 раза; увеличивается межремонтный цикл механизмов; снижается время на ремонт и обслуживание электропривода, особенно в тяжелых условиях работы механизмов и агрессивной окружающей среды (загазованность, запыленность, высокая температура воздуха).

5.9. Гибридное трансформаторно-тиристорное пусковое устройство и его экспериментальные испытания

Для реализации гибридного трансформаторно-тиристорного пускового устройства был разработан и изготовлен микропроцессорный блок системы управления, функциональная схема которого представлена на рисунке 5.31.

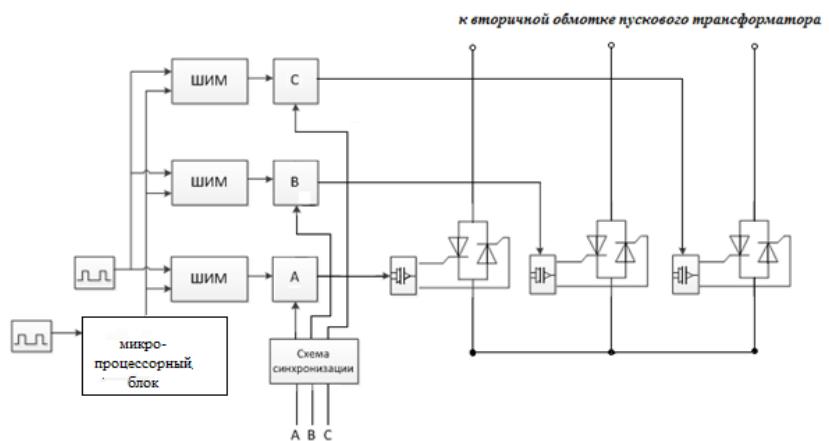


Рисунок 5.31. - Функциональная схема микропроцессорного блока системы управления гибридным трансформаторно-тиристорным пусковым устройством

Конфигурируемая система на кристалле E5 компании *Trisend* представляет собой законченную процессорную единицу и объединяет на одном кристалле улучшенную модель скоростного высокопроизводительного микроконтроллера, основанного на стандарте 8051, расширенный блок системной

ОЗУ, высокоскоростную системную шину и конфигурируемую логику, связанную с процессором и внутренней шиной. Семейство E5 представляет набор высоко интегрированных полностью статических систем, реализованных на одном кристалле и оптимизированных для встроенных системных приложений. Каждая микросхема семейства E5 имеет идентичный микроконтроллер и набор ресурсов. В качестве усилителя, осуществляющего гальваническую развязку входного сигнала от цепей контроллера, был выбран дифференциальный усилитель HCPL-7840 фирмы *Aggilent*. Микропроцессор поддерживается внутренними 8 кБ энергонезависимыми репрограммируемыми ПЗУ программ и 640 байтными энергонезависимыми репрограммируемыми ПЗУ данных. Была разработана печатная плата модуля системы на кристалле. Плата выполнена в четырехслойном исполнении. На рисунке 5.29 представлена фотография электронного блока управления тиристорным преобразователем напряжения.



Рисунок 5.32. - Общий вид электронного блока управления

Необходимо обратить внимание на конструктивное исполнение непосредственно корпуса, в котором смонтированы плата блока питания, плата интеллектуального модуля, клавиатура и дисплей. Электронный блок в условиях промышленной эксплуатации установлен в закрытом шкафу навесного

типа машинного зала цеха подготовки аглошахты № 2 ОАО «ММК» для управления асинхронным электродвигателем 132 кВт электропривода вентилятора. Программно реализуется задание начальных углов открытия вентилей с привязкой к фазам питающего напряжения. На рисунке 5.33 приведены обобщенные векторы пускового тока для двух программ управления пуском.

Из приведенных диаграмм видно заметное снижение пускового тока (рисунок 5.33) в 1,8 и 2,1 раза, при незначительном увеличении времени пуска. Таким образом, можно говорить об устройстве, повышающем энергоэффективность установки. Устройство введено в опытно-промышленную эксплуатацию.



Рисунок 5.33. - Временные диаграммы обобщенных векторов пускового тока двигателя при использовании трансформатора мощностью 63 кВА

Для определения момента двигателя, можно воспользоваться тем, что при измерениях токов и напряжений прибор анализатор качества электроэнергии НИОКИ 3197 оцифровывает значения с частотой 12,8 кГц, т.е. имеются данные мгновенных значений токов и напряжений во всех фазах. Можно вычислить производные потокосцепления по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_A}{dt} &= u_A - i_A R; \\ \frac{d\psi_B}{dt} &= u_B - i_B R; \\ \frac{d\psi_C}{dt} &= u_C - i_C R. \end{aligned} \right\} \quad (5.52)$$

Тогда электромагнитный момент определится как:

$$m_{\text{элмаг}}(t) = \frac{2}{\sqrt{3}} [(\psi_C - \psi_B) * i_A + (\psi_A - \psi_C) * i_B + (\psi_B - \psi_A) * i_C]. \quad (5.53)$$

Для программы пуска 2 рассчитаем электромагнитный момент по приведенной выше формуле, результат представлен на рисунке 5.35. Как видно момент не является знакопеременным.

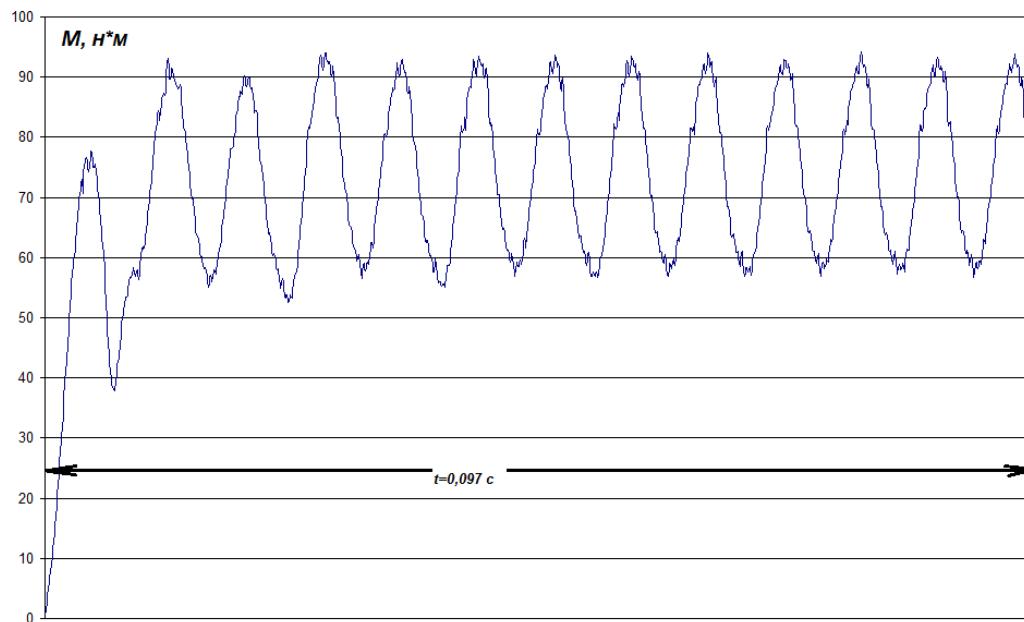


Рисунок 5.35. - Рассчитанный электромагнитный момент пуска двигателя

Для проверки работоспособности этого устройства на высоковольтных двигателях для двигателей 10кВ 630 кВт экскаваторов ГОП ОАО «ММК» предлагается сухой силовой трансформатор с литой изоляцией мощностью 250кВт. Аналогичные трансформаторы использовались для пуска двигателя вытяжного вентилятора 630 кВт 10кВ цеха «Рудник» Гайского горно-обогатительного комбината и при реализации пусковой системы для четырех высоковольтных электродвигателей вытяжных вентиляторов 630 кВт «Ново-каолинового ГОП».

5.10. Расчет теплового режима трансформатора, применяемого для пусковых устройств

При проектировании и использовании трансформаторного и трансформаторно-тиристорного пусковых устройств трансформаторов важную роль играет расчет теплового режима. Расчет теплового режима трансформатора представляет собой сложную математическую задачу, так как связан с расче-

том температурного поля трансформатора, а это приводит к необходимости учета геометрических характеристик конструкции трансформатора, теплофизических свойств материалов, условий теплообмена с окружающей средой. В настоящее время существует несколько подходов к решению этой задачи. В некоторых случаях используется аналогия между процессом переноса тепла и электричества, при этом все распределенные параметры трансформатора заменяются сосредоточенными [47, 59]. В других случаях расчет теплового режима сводится к расчету перегрева обмоток трансформатора без учета переноса тепла от обмоток к элементам конструкции трансформатора [53, 60]. Состояние вопроса совершенствования математических тепловых моделей элементов системы электроснабжения рассмотрены в [64].

Рассмотрим один из возможных подходов к расчету теплового режима трансформатора как к системе с распределенными параметрами. При этом появляется возможность не только рассчитать установившийся тепловой режим трансформатора, но и проследить динамику его нагрева при различных нагрузках и произвольном входном воздействии. В то же время такой расчет сводится к простой процедуре вычисления температуры перегрева трансформатора по элементарной формуле.

В основу расчета теплового режима трансформатора положено классическое уравнение теплопроводности, записанное в цилиндрических координатах.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{c_p} p(r, z, t), \quad (5.54)$$

где T – температура;

λ – коэффициент теплопроводности;

c – удельная теплоемкость, p -плотность материала;

t – текущее время;

(r, z, φ) – цилиндрические координаты [81].

В роли источника тепла здесь выступает плотность потерь $p(r, z, t)$ в трансформаторе. Как известно, потери имеют две составляющие: потери в стали и в проводах обмоток. Потери в стали приводят к тому, что стальной

сердечник трансформатора становится источником тепла. Будем считать, что каждый элементарный объем стали выделяет равное количества тепла. Потери в проводах обмоток определяются омическим сопротивлением проводов и протекающим через них током. Наиболее легко омические потери определить из опыта короткого замыкания путем измерения тока (I) в первичной обмотке и выделяемая тепловая мощность короткого замыкания P_{kz} . Зная потери, можно определить полное активное эквивалентное сопротивление R_0 обмоток из следующего выражения:

$$R_0 = \frac{P_{kz}}{I^2}, \quad (5.55)$$

Способ определения омического сопротивления обмоток путем вычисления сопротивления медного провода заданных длины и сечения, либо измерения сопротивления обмотки постоянному току, даст результат, отличающийся от вычисленного по (5.51). Это связано с тем, что при протекании тока через обмотки трансформатора имеет место поверхностный эффект, который приводит к увеличению сопротивления проводника переменному току.

$$\begin{aligned} P_0 &= U_{xx} I_{xx}; \\ P_1 &= R_0 I^2; \\ P &= R_0 I^2 + U_{xx} I_{xx}, \end{aligned} \quad (5.56)$$

где U_{xx} – напряжение холостого хода;

I_{xx} – ток холостого хода;

P_0 – потери в стали сердечника трансформатора;

P_1 – активные потери в обмотках;

P – суммарные потери в трансформаторе.

Суммарные потери в трансформаторе складываются из потерь в обмотках (P_1) и потерь в стали (P_0), последние не зависят от нагрузки и равны потерям холостого хода. Рассмотрим случай, когда активное сопротивление обмоток трансформатора зависит от температуры по линейному закону. Учитывая это, выделяемая тепловая мощность рассчитывается как:

$$P = I^2 R_0 [1 + \chi(T - T_0)] + P_0, \quad (5.57)$$

$$p = p_1 [1 + \chi(T - T_0)] + p_0, \quad (5.58)$$

где χ – температурный коэффициент сопротивления;

p – суммарная плотность потерь (потери, отнесенные к единице объема);

p_1 – плотность активных потерь;

p_0 – плотность потерь в стали.

Подставим (5.58) в правую часть дифференциального уравнения (5.54) и ограничимся случаем расчета средней температуры по объему трансформатора, так как для многих практических целей этого вполне достаточно. В связи с этим примем допущение, что тепло, выделяемое в обмотках трансформатора и в стали магнитопровода, распределяется равномерно по объему.

Предполагается, что на границе контакта поверхности трансформатора с окружающей средой действует закон конвективного теплообмена. Для описания процесса теплообмена используется закон Ньютона-Рихмара. Согласно этому закону, граничные условия для дифференциального уравнения (5.54) записываются в виде:

$$\left[-\lambda \frac{dT}{dn} = \alpha(T - T_0) \right]_S, \quad (5.59)$$

где $\frac{dT}{dn}$ – производная от температуры по нормали к поверхности трансформатора;

α – коэффициент теплообмена;

T_0 – температура окружающей среды;

S – поверхность трансформатора.

Теплообмен трансформатора с окружающей средой осуществляется через его поверхность. Поэтому для задания условий охлаждения необходимо для каждой поверхности ввести коэффициент теплообмена. Варьируя коэффициентами теплообмена, можно моделировать различные условия охлаждения трансформатора.

Трансформатор в нашем случае работает в режиме короткого замыкания. При коротком замыкании трансформатора выделяющиеся в обмотке потери от тока короткого замыкания увеличивают количество теплоты, содер-

жащейся в проводах и витковой изоляции. Из-за кратковременности процесса (1-2 с) теплота в окружающую среду практически не передается. После прекращения короткого замыкания начинается процесс охлаждения и за время, равное нескольким постоянным времени, обмотка опять принимает температуру окружающей среды.

В обмотке выделяются как основные потери, так и потери от вихревых токов. Основные потери прямо пропорциональны, а потери от вихревых токов обратно пропорциональны температуре.

Так как все выделяющиеся в проводнике длиной l потери, ввиду отсутствия теплоотдачи в окружающую среду, идут на увеличение количества теплоты, содержащейся в проводах и изоляции, то решение уравнения может быть записано в следующем виде [53]:

$$\left[I^2 * \frac{1}{\sigma_{cp}} * \frac{235 + \theta_0 + \Delta\theta}{235 + 75} * \frac{l}{A_r} + \frac{\kappa_{75}}{100} I^2 * \frac{235 + 75}{235 + \theta_0 + \Delta\theta} * \frac{l}{A_r} \right] dt = (A_r l \rho_r c_r + A_s l \rho_s c_s) d(\Delta\theta) = A_r l (\rho_r c_r + \psi \rho_s c_s) d(\Delta\theta), \quad (5.60)$$

где I – ток короткого замыкания;

A_r – площадь поперечного сечения проводника;

A_s – площадь поперечного сечения изоляции проводника;

$\psi = A_s/A_r$, $I/A_r = J$ – плотность тока при коротком замыкании;

75 – удельная электрическая проводимость проводника при температуре 75°C ;

σ_{cp} – средняя температура обмотки в момент короткого замыкания;

l – длина проводника;

ρ_r – плотность меди;

ρ_s – плотность материала изоляции;

c_r – удельная теплоемкость меди;

c_s – удельная теплоемкость материала изоляции;

κ_{75} – относительные потери от вихревых токов в процентах основных потерь при 75°C ;

$\Delta\Theta$ – изменение средней температуры обмотки за время короткого замыкания (по отношению к исходной температуре Θ_0);

$d(\Delta\Theta)$ – изменение средней температуры обмотки за промежуток времени dt .

Сделаем некоторые упрощения в равенстве (5.60)

$$\frac{J^2}{\sigma_0} \left(\frac{235 + \theta_0}{310} + \frac{\Delta\theta}{310} + \frac{875 \cdot 3,1}{235 + \theta_0 + \Delta\theta} \right) dt = (\rho_r c_r + \psi \rho_s c_s) d(\Delta\theta)$$

Проведем разделение переменных

$$\begin{aligned} dt &= \frac{\sigma_0}{J^2} (\rho_r c_r + \psi \rho_s c_s) * \frac{1}{\frac{235 + \theta_0}{310} + \frac{\Delta\theta}{310} + \frac{875 \cdot 3,1}{235 + \theta_0 + \Delta\theta}} d(\Delta\theta) = \\ &= \frac{310 \sigma_0 (\rho_r c_r + \psi \rho_s c_s)}{J^2} \frac{235 + \theta_0 + \Delta\theta}{\Delta\theta^2 + 2(235 + \theta_0)\Delta\theta + (235 + \theta_0)^2 + 960 \cdot 875} d(\Delta\theta) \end{aligned}$$

Введем следующие обозначения:

$$\begin{cases} \Delta\theta = x, d(\Delta\theta) = dx \\ \frac{310 \sigma_0 (\rho_r c_r + \psi \rho_s c_s)}{J^2} = a_1 \\ 235 + \theta_0 = a_2; 960 \cdot 875 = a_3. \end{cases} \quad (5.61)$$

Коэффициенты a имеют следующие размерности: $a_1, a_2, a_3, {}^\circ\text{C}$.

С учетом принятых обозначений дифференциальное уравнение переходного процесса нагрева трансформатора (5.60) принимает вид:

$$dt = \frac{a_1 x + a_1 a_2}{x^2 + 2a_2 x + a_2^2 + a_3} dx = \frac{a_1}{2} \frac{2x + 2a_2}{x^2 + 2a_2 x + a_2^2 + a_3} dx. \quad (5.62)$$

Проинтегрируем уравнение (5.62)

$$\int dt = \frac{a_1}{2} \int \frac{2x + 2a_2}{x^2 + 2a_2 x + a_2^2 + a_3} dx. \quad (5.63)$$

В результате интегрирования получаем:

$$t = \frac{a_1}{2} \ln(x^2 + 2a_2 x + a_2^2 + a_3) + C. \quad (5.64)$$

Если $t=0$, то $x=0$ и постоянная интегрирования равна

$$C = -\frac{a_1}{2} \ln(a_2^2 + a_3). \quad (5.65)$$

Подставляем выражение (5.61) для C в уравнение (5.64):

$$t = \frac{a_1}{2} \ln \frac{x^2 + 2a_2 x + a_2^2 + a_3}{a_2^2 + a_3}. \quad (5.66)$$

Заменим натуральный логарифм степенной функцией с основанием e :

$$e^t = \left(\frac{x^2 + 2a_2x + a_2^2 + a_3}{a_2^2 + a_3} \right)^{a_1/2}. \quad (5.67)$$

$$x^2 + 2a_2x + (a_2^2 + a_3) \left(1 - e^{2t/a_1} \right) = 0. \quad (5.68)$$

$$\begin{aligned} x &= -a_2 + \sqrt{a_2^2 - (a_2^2 + a_3) * (1 - e^{2t/a_1})} = \\ &= -a_2 + \sqrt{e^{2t/a_1} * (a_2^2 + a_3) - a_3} \end{aligned} \quad (5.69)$$

Окончательно уравнение для изменения средней температуры обмотки за время короткого замыкания с учетом (5.61) приобретает следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \sqrt{e^{2t/a_1}[(\theta_0 + 235)^2 + 960\kappa_{75}] - 960\kappa_{75}} - \\ &\quad (\theta_0 + 235) = \\ &= 31\sqrt{e^{2t/a_1} \left[\left(\frac{\theta_0 + 235}{31} \right)^2 + \kappa_{75} \right] - \kappa_{75}} - (\theta_0 + 235), \end{aligned} \quad (5.70)$$

где a_1 определяется по (5.44).

Исходное дифференциальное уравнение (5.61) для нагрева обмотки во время короткого замыкания было составлено с учетом потерь от вихревых токов и теплоемкости изоляции. Если потерями от вихревых токов пренебречь, то члены, содержащие κ_{75} , выпадут из уравнения (5.70). Если пренебречь и теплоемкостью изоляции, то согласно (5.61).

$$a_1 = \frac{310\sigma_0\rho_r c_r}{J^2}. \quad (5.71)$$

Физические постоянные, входящие в a_1 (для интервала температур от 100 до 200°C):

для меди $\rho_r = 8900 \text{ кг}/\text{м}^2$; $\sigma_0 = 10^6/0,0217 \text{ См}/\text{м}$; $c_r = 401 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$;

для алюминия $\rho_r = 2700 \text{ кг}/\text{м}^2$; $\sigma_0 = 10^6/0,036 \text{ См}/\text{м}$; $c_r = 961 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$;

С помощью коэффициента ψ можно учесть не только отношение сечений проводника и его изоляции, но также то, что тепло проводника передается изоляции с некоторым запаздыванием во времени.

Проверим выводы сделанные п. 5.8. Для этого воспользуемся данными таблицах 5.4 и 5.5, такими как, напряжение на трансформаторе в момент пус-

ка, значение пускового тока, и определим по (5.61) изменения температуры обмотки за время пуска при трехфазном коротком замыкании пускового трансформатора и бесконечной мощности сети. Допущения, сделанные при проведении расчетов следующие: в момент короткого замыкания средняя температура обмотки $\Theta_0=25^{\circ}\text{C}$, относительные потери от вихревых токов $\zeta=15\%$. Теплоемкость изоляции проводников не учитываем. Обмотка изгото-
влена из меди. Одновременно будем измерять температуру обмоток транс-
форматора планарным кремниевым температурным датчиком КТУ 84-130 с
положительным термокоэффициентом. Температурный диапазон датчика -
 $60^{\circ}\text{C}...+300^{\circ}\text{C}$. Время достижения максимальной температуры 250°C опреде-
лим по [38]:

$$t_{250} \approx 2.5 \left[u_k / (J * 10^{-6}) \right]^2.$$

Результаты измерений и расчетов сведены в таблицу 5.8.

Можно построить график (рис 5.36) зависимости превышения темпе-
ратуры обмоток пускового трансформатора от превышения мощности АД к
мощности трансформатора Р*.

*Таблица 5.8 - Расчетные и измеренные значения температуры
трансформатора*

<i>Мощ- ность двигателя, P_{de}, кВт</i>	<i>Мощность трансфор- матора, S_{mp}, кВт</i>	<i>Отно- шение мощно- стей P_{de}/S_{mp}</i>	<i>Превыше- ние темпе- ратуры, по ф-ле, $^{\circ}\text{C}$</i>	<i>Измеренное значение температуры, $^{\circ}\text{C}$</i>	<i>Время пус- ка/Время достиже- ние макси- мальной температуры, с</i>
45	40	1,125	18,6	34	0,447/1,43
45	63	0,715	5,8	31	0,54/1,54
132	40	3,3	103	120	1,5/2,54
132	63	2,1	83	105	1,15/2,54
0,6	1,6	0,375	2	28	0,1/12,2
1,5	1,6	0,9375	14,6	40	0,19/8,18
2,2	1,6	1,375	22	47	0,25/7,11
5,5	1,6	3,44	107	81	0,34/6,4
7,5	1,6	4,7	114	120	0,474/5,9

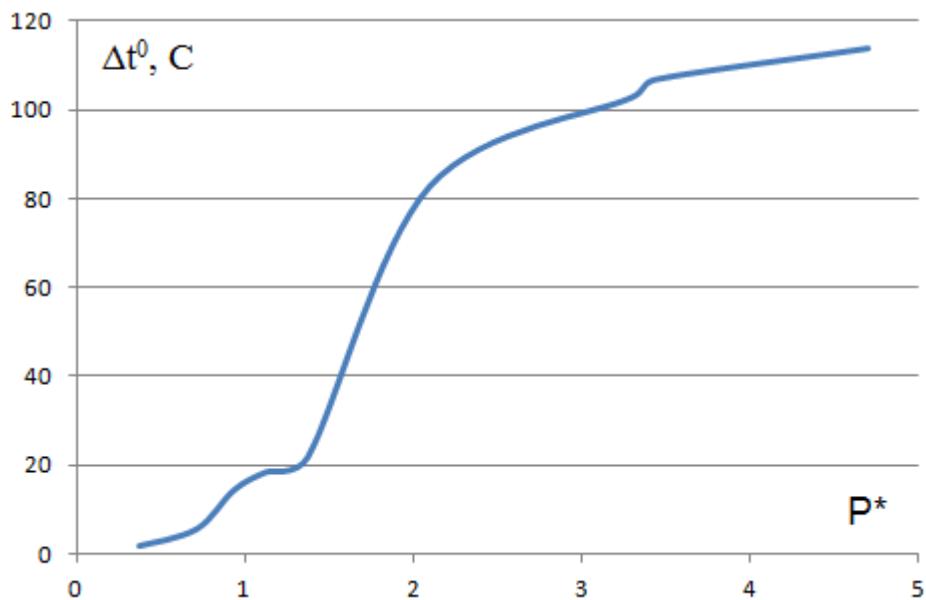


Рисунок 5.36. - Зависимость превышения температуры обмоток пускового трансформатора от превышения мощности АД к мощности трансформатора P^*

По результатам приведенным в таблице и графике можно сделать следующие выводы:

1. Расчетные и экспериментальное измерение температуры пускового трансформатора не превышает 2%.
2. Мощность асинхронного двигателя может превышать мощность пускового трансформатора в 2,5-3 раза без перегрева последнего, при мощности трансформатора меньше 3-5 раз пуск без автоматического регулирования не возможен по условиям нагрева пускового трансформатора

Выводы по главе 5

1. Предложены структурные схемы реализации трансформаторно-тиристорных пусковых устройств, которые позволяют реализовать управляемый пуск высоковольтных асинхронных двигателей.
2. Из стандартных библиотечных блоков пакета *MatLab* приложения *Simulink* предложена компьютерная модель системы «трансформаторно-тиристорное пусковое устройство – высоковольтный асинхронный двигатель»

тель» с инженерной точностью отражающая работу двигателя с различными нагрузками.

3. Исследования, проведенные на высоковольтных асинхронных двигателях промышленных предприятий, показали эффективность разработанного пускового устройства и возможности его применения.

4. Определено на модели и подтверждено экспериментально, что оптимальный вариант для реализации пусковых устройств является использование в них трансформаторов с номинальным напряжением ниже напряжения сети, так для двигателей 10кВ используется трансформатор на 6кВ.

5. Стоимость предложенного трансформаторно-тиристорного пускового устройства для высоковольтных двигателей не превышает 538,6 тыс. руб., что в 3-4 раза дешевле аналогичных пусковых устройств ведущих отечественных фирм.

6. Проведенные исследования на модели, позволили определить зависимости кратности пускового тока от угла управления тиристорами пускового устройства. Предложенное пусковое устройство позволит снизить амплитуду ударного момента до величины, не превышающего $1,2M_n$, а амплитуды тока в 2 раза больше номинального.

7. Проведенные расчеты нагрева трансформатора при использовании последнего в качестве пускового устройства показывают, что мощность асинхронного двигателя может превышать мощность пускового трансформатора в 2,5-3 раза без перегрева последнего, при мощности трансформатора меньше 3-5 раз пуск без автоматического регулирования не возможен по условиям нагрева пускового трансформатора.

6. ОЦЕНКА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

6.1. Научная новизна

В процессе решения поставленных задач были получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана методика диагностирования электроприводов переменного тока, на основе концепции проактивного обслуживания.
2. Обоснованы требования с позиции системного подхода к разработке современных систем диагностирования электроприводов переменного тока, основанные на выявлении неисправностей в динамических режимах работы двигателя.
3. Предложены проблемно-ориентированные модели состояния асинхронного двигателя, реализованные на основе конечно-элементной схемы и модели с открытой архитектурой.
4. Теоретически обоснованы методы и целесообразность применения для высоковольтных асинхронных электроприводов технологических установок, малозатратных пусковых устройств.
5. Предложен ресурсоэффективный способ пуска асинхронного двигателя, с использованием резервного двигателя (система каскадного пуска).
6. 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.

6.2. Практическая значимость

Практическая ценность заключается в том, что разработанный способ каскадного пуска асинхронных электроприводов в двухдвигательной системе позволяет реализовать режим «мягкого» пуска мощных высоковольтных электродвигателей без применения специальных пусковых устройств. Сни-

жение пусковых перегрузок по моменту и току при каскадном пуске способствует повышению надежности эксплуатации оборудования и приводит к снижению эксплуатационных расходов за счет увеличения длительности межремонтных циклов. Возможность осуществления «мягкого» пуска позволяет также своевременно отключать электродвигатели на время снятия технологических нагрузок, что обеспечивает дополнительное снижение электропотребления. 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 трест «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 «Ново-каолиновый ГОП». Разработанная методика диагностирования неисправностей асинхронных двигателей, в отличие от существующих методов, применяется 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 использоваться 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 двухдвигательной системы для исследования электромагнитных и электромеханических процессов при пус-

ке, конечно-элементная математическая модель АД и конечно-элементная тепловая модель рекомендованы для внедрения в учебный процесс при изучении дисциплин подготовки бакалавров и магистров по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок».

6.3. Экономическая эффективность

Результаты работы были внедрены на промышленных предприятиях. В таблице 6.1. представлен экономический эффект от реализации предложенных решений. Суммарный экономический эффект составляет 10860 тысяч рублей. Акты внедрения приведены в приложениях 1-5.

Таблица 6.1. - Экономическая эффективность предложенных решений

Предприятие	Количество и мощность	Экономический эффект	Год внедрения и что
Система охлаждения электропечи. ЗАО «Консом», г.Магнитогорск	6 АД, 15 кВт, 380 В	1200 000 руб.	2008г. Каскадный пуск
Трест «Водоканал», г.Магнитогорск 36 насосная станция	3 АД, 630кВт, 6кВ	1800 000 руб.	2009г. Каскадный пуск
Гайский ГОК, г. Гай, вентиляторная станция	3 АД, 630кВт, 6кВ	1460 000 руб.	2010г. Трансформаторно-тиристорное пусковое устройство. Система диагностирования АД
ОАО Новокаолиновый ГОК. Челябинской обл. вентиляторная станция	4 АД, 630кВт, 6кВ	2800 000 руб.	2011г. Трансформаторное пусковое устройство. Система диагностирования АД
Завод решетчатого настила, г.Магнитогорск, вентиляторная станция	3 АД, 630кВт, 10кВ	3600 000 руб.	2012г. Трансформаторно-тиристорное пусковое устройство.
ОАО ММК, горно-обогатительное производство	ЦПАШ, экскаватор	4 АД, 630кВт, 10кВ	Работы с 2008 по настоящее время. Трансформаторно-тиристорное пусковое устройство. Система диагностирования АД
	Рудник, экскаваторы	50 АД 630кВт, 10кВ	
	ДОФ-3	3 АД, 1000 кВт, 10кВ	
	ЦПАШ, вентилятор	АД, 132кВт, 380 В	

6.4. 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК)

1. Ильинский Н.Ф., Рожанковский Ю.В., Горнов А.О. Энергосбережение в электроприводе // Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства / Под ред. В.А. Веникова.- М.: Высш.шк., 1989.-129 с.
2. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода. - М.: МЭИ, 2007. - 222с., ил.
3. Ильинский Н.Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение (1-е изд.) учеб. пособие.: Академия, 2008. – 208 с.
4. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
5. Чиликин М.Г., Соколов Н.М., Терехов В.М., Шинянский А.В. Основы автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1974. – 568 с.
6. Адаменков А.К., Веселова И.Н., Козырев В.Д. Ваттметрия. Диагностика электроприводной арматуры по мощности – возможность перехода от ремонта по регламенту к ремонту по техническому состоянию // Арматуростроение. – 2006. – №2(41). – С. 57-61.
7. Андреева О.А. Разработка методов диагностики двигателей собственных нужд электрических станций: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2009. – 22 с.
8. Андрющенко О.А., Бабийчук О.Б., Вычужанин А.А. Асинхронный электропривод с тиристорным преобразователем напряжения, синхронизированным с током нагрузки // Электромашиностроение и электрооборудование. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. К.: Техніка, 1991. – Вып. 46. – С. 29-32.
9. Андрющенко О.А., Бойко А.А. Исследование устойчивости разомкнутых систем электропривода ТПН–АД // Электроприводы переменного тока: Тр. XIV научно-технич. конф. (13-16 марта 2007 г.) – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. – С. 127-130.

10. Анисимов В.А., Горнов А.О., Москаленко В.В., Рожанковский Ю.В. Специальные режимы пусковых устройств для асинхронных двигателей // Электротехника. – 1994. – № 7. – С. 23-26.
11. Анисимов Д.М., Петушкин М.Ю., Вечеркин М.В., Сарваров И.А. Разработка математической модели системы «Трансформаторно-тиристорный пускатель-асинхронный двигатель». Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. Тр. Вып.15.- Магнитогорск, 2008. - С.191-195.
12. Антипин А.А. Плавный пуск и новое имя на российском рынке электротехники. Электротехнический рынок. №5(11), 2007. – С.18-20.
13. Аншина М., Сопровожение программных систем\ Управляем предприятием, эл. журнал 08.05.2012 / №5 (16) / 8 с.
14. Асинхронные электродвигатели: технический каталог: разработчик и изготовитель Владимирский электромоторный завод. – Владимир, 2008. – 116 с.
15. Баширов М.Г., Сайфутдинов Д.М. Обеспечение безопасности эксплуатации насосно-компрессорного оборудования с электрическим приводом электромагнитными методами диагностики // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело", 2002 режим доступа:
http://www.ogbus.ru/authors/Bashirov/bash_1.pdf.
16. Беспалов В.Я., Зверев К.Н. Импульсные перенапряжения в обмотках асинхронных двигателей при питании от ШИМ-преобразователей // Электротехника. -1999. – № 9. С. 56-59.
17. Беспалов В.Я., Мошинский Ю.А., Петров А.П. Математическая модель асинхронного двигателя в обобщенной ортогональной системе координат // Электричество. – 2002. – № 8. – С. 33-39.
18. Беспалов В.Я., Мошинский Ю.А., Цуканов В.И. Упрощенная математическая модель нестационарного нагрева и охлаждения обмотки статора асинхронного двигателя // Электричество. – 2003. – № 4. – С. 20-26.

19. Бессонов Л.А. Нелинейные электрические цепи. Изд. 3-е, перер. и доп. Учеб. пособие для втузов. - М., «Высш. школа», 1977.
20. Бойко А.А., Мельникова Л.В., Бабийчук О.Б. Методика математического моделирования электропривода ТПН–АД в трехфазных осях // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2003.– Вип. 61.– С. 24-28.
21. Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
22. Браславский И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. – М.: Энергоатомиздат, 1988.– 224 с.
23. Браславский И.Я. О возможностях энергосбережения при использовании регулируемых асинхронных электроприводов // Электротехника. – 1998. – № 8. – С. 2-6.
24. Браславский И.Я., Зюзев А.М., Костылев А.В. Исследование свойств систем «тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель» с различными типами синхронизации // Электротехника. – 2000. – № 9. – С. 1-5.
25. Браславский И.Я., Зюзев А.М., Костылев А.В. Разработка, исследование, внедрение систем «тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель» // Электротехника. – 2004. – № 9. – С. 13-16.
26. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.
27. Браславский И.Я., Плотников Ю.В. Математические модели для определения энергопотребления различными типами асинхронных электроприводов и примеры их использования//Электротехника.–2005.–№9.–С. 14-18.
28. Бугаев Г.А., Леонтьев А.Н., Ерохин Е.Ю., Павлова Д.В. Математические модели нагрева и охлаждения асинхронных двигателей для микропроцессорного реле тепловой защиты//Электротехника.–2001.–№2.–С. 51-54.

29. Бутырин П.А., Гафиятуллин Р.Х., Шестаков А.Л. Электротехника. Уч. пособ. для вузов. Книга III. Электроприводы. Электроснабжение. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 639 с.
30. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние. 1980 г.- 286 с., ил.
31. Вейнгер А.М. Перспективы регулируемых электроприводов переменного тока большой мощности. - IV Международная (XV Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу. - 14-17 сентября, 2004, Магнитогорск, С. 32-37.
32. Вечеркин М.В. Разработка и исследование пускорегулирующих устройств высоковольтного электропривода вентиляторной станции: диссертация .. кандидата технических наук : 05.09.03. - Магнитогорск, 2006. - 118 с. : ил.
33. Вечеркин М.В., Сарваров А.С. Перспективы применения высоковольтного трансформаторно-тиристорного пускового устройства в составе вентиляторных станций. Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: Труды Третьей Всероссийской научно-практической конференции / Под общей ред. В.Ю. Островлянчика, П.Н. Кунина. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – 300 с.
34. Петушкив М.Ю., Вечеркин М.В., Сарваров А.С., Особенности реализации трансформаторно-тиристорных пусковых устройств для высоковольтных электродвигателей переменного тока. Материалы XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технология». Труды в 2-х т. – Томск: Томский политехн. ун-т, 2006 – Т.1. – С. 243-245.
35. Виноградов А.Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе // Электротехника. – 2005. – № 5. – С. 57-62.

36. Волохов С.А., Добродеев П.Н., Кильдишев А.В. Диагностирование обрыва стержня клетки ротора асинхронного электродвигателя // Электротехника. – 1998. – №2. – С. 13-15.
37. Вольдек А.И. Электрические машины.-Л.:Энергия, 1974. - 840 с.
38. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов: Учеб. пособие для вузов: Учеб. пособие для сред. проф. образования/ Г.Ф.Быстрицкий, Б.И.Кудрин. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. -176 с.
39. Гашимов М.А., Гаджиев Г.А., Мирзоева С.М. Диагностирование эксцентрикитета и обрыва стержней ротора в асинхронных электродвигателях без их отключения // Электротехника. – 1998. – №10. С. 46-51.
40. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА прнт, 2001. – 320 с., ил.
41. Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: КОРОНА-прнт, 2003. – 256 с., ил.
42. Гладырь А.И. Технологические предпосылки применения пусковых систем с квазичастотным управлением\ Проблеми створення нових машин і технологій: Зб. наук. пр. КДПІ. Вип 2(9).- Кременчук. 2000. – С.84-88.
43. Гладырь А.И., Родькин Д.Й. Технические предпосылки применения регулированного и управляемого электропривода\ Проблеми створення нових машин і технологій: Зб. наук. пр. КДПІ. Вип 1(8).- Кременчук. 2000г., – с.25-27.
44. Глазунов Л.П., Смирнов А.Н. Проектирование технических систем диагностирования. – Л.: Энергоатомиздат, 1982. – 168 с.
45. Гольдберг О.Д. Качество и надежность асинхронных двигателей. – М.: Энергия, 1968. – 176 с.
46. Гончарук А.И. Расчет и конструирование трансформаторов.- М.: Энергия, 1990. - 256 с., ил.

47. Горский А.Н., Русин Ю.С., Иванов Н.Р., Сергеева Л.А. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания. М.: Радио и связь, 1988. - 176 с.
48. ГОСТ 20911-75. Техническая диагностика: Основные термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 10 с.
49. Грузов Л.Н. Методы математического исследования электрических машин. – М.: Госэнергоиздат, 1953. – 264 с.
50. Деро А.Р. Неполадки в работе асинхронного двигателя. – Л: Энергия, 1976. – 96 с.
51. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: Учебное пособие для вузов. – М.: Высш. Шк., 1999. – 718 с.
52. Дмитриев Б.Ф., Черевко А.И., Гаврилов Д.А. К вопросу о построении универсальной математической модели обобщенной электрической машины в программной среде MatLab–Simulink // Электротехника. – 2005. – № 7. – С. 3-8.
53. Дымков А. М. Расчет и конструирование трансформаторов. Учебник для техникумов – М. «Высш. школа», 1971. - 264 с. с ил.
54. Дьяконов В. Simulink 4. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 528 с.
55. Ермолин Е.М., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. – Л.: Энергия, 1976. – 248 с.
56. Зайнберг А.М. Индукционные плавильные печи. Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1967. – 832 с.
57. Ишматов З.Ш., Плотников Ю.В., Барац Е.И., Белоусов А.А. Обзор высоковольтных преобразователей частоты. Тр. межд.конф. «Электроэнергетика и Автоматизация в металлургии и машиностроении». г. Магнитогорск, 22-24 октября 2008. – С.29 – 42.
58. Калашников Б.Е. Проблемы «длинного кабеля» в электроприводах с IGBT-инверторами // Электротехника. – 2002. – №12. – С. 24 - 26.

59. Картникова Е.И., Рычина Т.А., Ермаков А.И. Трансформаторы питания и дроссели фильтров для радиоэлектронной аппаратуры. - М.: Советское радио, 1973. – 180 с.
60. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. - М: Высшая школа, 1985. - 480 с.
61. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 480 с.
62. Каширских В.Г., Переверзев С.С. Сравнительный анализ способов управления режимами пуска асинхронного электродвигателя. Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: Труды Третьей Всероссийской научно-практической конференции / Под общей редакцией В.Ю. Островлянчика, П.Н. Кунина. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2006. – 300 с.
63. Кесслер А. Расчет нагрева асинхронных двигателей при тяжелом пуске и торможении противовключением // Электричество. – 1963. – № 6. – С. 12-17.
64. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. Перевод с венгерского М. А. Бики/Под редакцией Г. Е. Тарле.-М.: «Энергия», 1980. 180 с., ил.
65. Ключев В. И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с., ил.
66. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
67. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока / Пер. с нем. А.А. Дартау, В.А. Щедровича; под ред. А.И. Вольдека. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 735 с.
68. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов по спец. «Электрические машины». – М.: Высш. шк., 1987. – 284 с. ил.

69. Копылов И.П. Применение вычислительных машин в инженерно-экономических расчетах (Электрические машины): Учебник. – М.: Высш. школа, 1980. – 256 с.
70. Копылов И.П. Электрические машины: Учеб. для вузов / И.П. Копылов. – 4-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2004. – 607 с.
71. Копылов И.П., Щедрин О.П. Расчет на ЦВМ характеристик асинхронных машин. – М.: Энергия, 1973. – 120 с.
72. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины, Ч. 2. Машины переменного тока. - Л.: Энергия, 1973. - 648 с.
73. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин. – М.: Высшая школа, 1988. – 230 с.
74. Котлярчук В.А., Гончаров А.Ф. Электроснабжение экскаваторов. – М.: Надра, 1980. – 240 с.
75. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов. - М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.
76. Купцов В.В. Разработка метода диагностирования АД на основе конечно-элементной модели: диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.03 - Магнитогорск, 2010. - 142 с. : ил.
77. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981.- 392 с.
78. Лейтес Л.В., Пинцов А.М. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов. – М. «Энергия», 1974. – 192 с.
79. Лихачев В.Л. Справочник обмотчика асинхронных электродвигателей. – М: СОЛОН-Пресс, 2005. – 240 с.
80. Лукьянов С.И., Панов А.Н. Обработка экспериментальных данных. – Магнитогорск: МГМА, 1997. – 75 с.
81. Лыков А. А. Повышение эффективности работы систем электроснабжения на основе совершенствования моделей силовых трансформаторов и кабелей. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Кубан. гос. технол. ун-т.- Краснодар, 2007. 22 с.

82. Маколов В.Н. Разработка математической модели синхронного двигателя в трехфазной системе координат А, В, С. – Межвузовский сборник научных трудов под ред. Сарварова А.С., Одинцова К.Э. – Магнитогорск: МГТУ им. Носова, 2001., С. 212-220.
83. Макурина А.С. Модернизация электропривода волочильного стана магазинного типа с использованием тиристорного регулятора напряжения : диссертация .. канд. техн. наук : 05.09.03. – Магнитогорск. МГТУ им. Носова, 2005. - 124 с. : ил.
84. Мандыч Н.К. Ремонт электродвигателей. Пособие электромонтеру. – К: Техника, 1989. – 152 с.
85. Масандилов Л.Б., Анисимов В.А., Горнов А.О., Крикунчик Г.А., Москаленко В.В. Опыт разработки и применения асинхронных электроприводов с тиристорными преобразователями напряжения // Электротехника. – 2000. – № 2. – С. 32-36.
86. Масандилов Л.Б., Гетман Ю.И., Мелихов В.Л. Особенности квазичастотного управления асинхронного двигателя// Электротехника. - 1994.- №5-6. - С. 16-20.
87. Масандилов Л.Б., Москаленко В.В. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. – М.: Энергия, 1978. – 96 с.
88. Масандилов Л.Б., Рожанковский Ю.В., Гетман Ю.И. Асинхронный электропривод с тиристорным преобразователем переменного напряжения при различных режимах работы // Автоматизированный электропривод / Под. ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова. –М.: Энергоатомиздат, 1986.– С. 124-129.
89. Математическая модель синхронного двигателя с постоянными магнитами на роторе. Глазунов В.Ф., Пикунов В.В., Митрофанов А.С. // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. Сб. научн. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2002. вып.7. С. 40-48.
90. Мелихов В.Л. Разработка электроприводов грузоподъемных машин небольшой мощности по системе тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. –Москва, 1994. – 16 с.

91. Мошинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. – 1998. – № 4. – С. 38-42.
92. Муриков Е.С. Исследование режима каскадного пуска асинхронного электропривода: диссертация ... канд. техн. наук : 05.09.03. - Магнитогорск, МГТУ им. Носова. 2006. - 139 с. : ил.
93. Назаров Н.Г. Метрология. Основные понятия и математические модели. – М.: Высшая шк., 2002. – 348 с.
94. Обрускин В.П. Электроприводы переменного тока, их проблемы // Труды V международной (XVI Всероссийской) научной конференции по автоматизированному электроприводу: 18-21 сентября 2007 г. – Санкт-Петербург, 2007. – С. 133-135.
95. Овчаренко А.С., Розинский Д.И. Повышение эффективности электроснабжения промышленных предприятий. – К.: Техника, 1989. – 287 с.
96. Омельченко Е.Я. Математическая модель трехфазного асинхронного электродвигателя с фазным ротором // Электроприводы переменного тока: Тр. XIV научно-технич. конф. (13-16 марта 2007 г.) – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. – С. 185-188.
97. Омельченко Е.Я., Харламов А.В. Моделирование на ЭВМ переходных процессов в асинхронном электроприводе // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 1998. – Вып. 4. – С. 36-42.
98. Осипов О.И. Основы технической диагностики автоматизированных электроприводов. Учебное пособие. – Челябинск: ЧПИ, 1982. – 87 с.
99. Осипов О.И., Агафонов А.Н. Техническое диагностирование асинхронного двигателя // Труды Моск. энерг. ин-та. Электропривод и системы управления. – 2000. – Вып. 676. – С. 22-29.
100. Осипов О.И., Агафонов А.Н., Булеков С.Ю. Проблемы распознавания дефектов электрических машин переменного тока // Материалы науч-

но-технической конф. "Научные идеи В.А. Шубенко на рубеже веков". – Екатеринбург, 1999. – С. 81-84.

101. Осипов О.И., Усынин Ю.С. Техническая диагностика автоматизированных электроприводов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 160 с.

102. Пархоменко П.П. Основы технической диагностики (Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства). – М.: Энергия, 1981. – 320 с.

103. Переверзев С.С. Обоснование скорости нарастания напряжения при управляемом пуске асинхронного электропривода. Материалы XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии». Труды в 2-х т. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2006 – Т.1. – 524 с.

104. Петренко А. Н., Осташевский Н. А., Петренко Н. Я., Шайда В. П., Експериментальне исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в нестационарных режимах. Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – № 4. – С. 266-267.

105. Петров И.И., Мейтель А.М. Специальные режимы работы асинхронного электропривода. - М.: Энергия, 1968. – 264 с.

106. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 184 с.

107. Петров Л.П., Капинос В.И., Херунцев П.Э. Оптимизация энергопотребления при квазичастотном управлении асинхронными электроприводами // Автоматизированный электропривод / Под. ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 354-359.

108. Петров Л.П., Ладензон В.А, Обуховский М.П., Подзолов Р.Г. Асинхронный электропривод с тиристорными коммутаторами. – М.: Энергия, 1970. – 128 с.

109. Петров Л.П., Ладензон В.А, Подзолов Р.Г., Яковлев А.В. Моделирование асинхронных электроприводов с тиристорным управлением. – М.: Энергия, 1977. – 200 с.
110. Петухов В. С. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка напряжения и тока // Новости электротехники. – 2008. – №49. – С. 65-69.
111. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники. – 2005. – №31. – С. 50-52.
112. Петухов В.С., Соколов В.А. Повреждения трансформаторов и электродвигателей. Причина – в системе плавного пуска// Новости электротехники. – 2005. – № 2(32).
113. Петушкин М.Ю. Исследование трансформаторного пускового устройства асинхронных двигателей. // Фундаментальные исследования. №12 (часть 3), 2011 - С.584-586.
114. Петушкин М.Ю. Надежность электронных устройств. Учебное пособие. Магнитогорск. МГТУ им. Носова. 2008, 109 с.
115. Петушкин М.Ю. Электропривод машины центробежного литья валков по системе ТПН-АД (монография) //А.С. Сарваров, А.Д. Стригов, И.А. Сарваров, А.М. Валяева, Петушкин М.Ю. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ». 2010. – 134 с.
116. Петушкин М.Ю., Радионов А.А., Усатый Д.Ю., Одинцов К.Э. Определение конструктивных и электрических параметров индукционного реостата для пуска асинхронного двигателя с фазным ротором. Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2001. -Вып. 6. - С. 115-120.
117. Писарев А.Л., Деткин Л.П. Управление тиристорными преобразователями. – М.: Энергия, 1975. – 264 с.
118. Пономарев В.А., Суворов И.Ф., Юдин А.С. Метод функциональной диагностики повреждений в обмотках статора асинхронных двигателей с

оперативным анализом несимметрии полных обмоток // Промышленная энергетика. – 2008. – №7. – С. 17-21.

119. Прайс-лист электротехнической компании ООО «ОптимЭлектро» от 20 марта 2011 года, www.optimele.ru.

120. Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Копылова. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2002. – 757 с.

121. Радимов С.Н. Опыт внедрения частотно-регулируемых электроприводов // ЭСТЛ-Энергосберегающие технологии и автоматизация. Международный благотворительный фонд "Человек и современный мир", изд-во Данко, Киев, №1-2, 2001. С. 54-56.

122. Радимов С.Н. Потенциал энергосбережения и его реализация средствами электропривода //Научно-технический журнал "Мир техники и технологий", ООО издательский дом "Проминь", г. Харьков, № 1, 2004, С. 59-63.

123. Решемин Б.И. Уточненная модель асинхронного двигателя как объект для построения системы управления // Электротехника. – 2005. – № 7. – С. 14-19.

124. Романов Р. А., Севастьянов В. В. Современные средства и методики диагностики оборудования горнодобывающей и горноперерабатывающей отрасли согласно концепции «Надежное оборудование». \\ <http://www.baltech.ru/catalog.php?catalog=140>

125. Сарваров А.С. , Славгородский В.Б. , Маколов В.Н. , Вечеркин М.В.. Вопросы разработки трансформаторно-тиристорных пусковых устройств для высоковольтного электропривода переменного тока // Электроприводы переменного тока: Труды международной тринадцатой научно-технической конференции. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. 376 с.

126. Сарваров А.С., Горзунов А.С., Купцов В.В. Разработка методики токовой диагностики асинхронных двигателей по осцилограммам нестационарных режимов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2009. – №34 (167). – С. 48-53.

127. Сарваров А.С., Петушкин М.Ю., Вечеркин М.В., Усатый Д.Ю., Анисимов Д.М. Анализ состояния электроприводов агрегатов ГОП ОАО «ММК» и пути модернизации. Вестник МГТУ им.Г.И.Носова №3(35), 2011 С.8-11.
128. Сарваров А.С., Петушкин М.Ю., Купцов В.В. Конечно-элементная модель асинхронного двигателя, Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ М.: ВНИЦентр, гос. № 2010610103 от 11.01.2010.
129. Сарваров А.С., Петушкин М.Ю., Купцов В.В. Современные методы диагностирования асинхронных двигателей и их развитие (монография) Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010, 247с.
130. Сарваров А.С., Петушкин М.Ю., Сарваров И.А., Валяева А.М. Способ пуска трехфазного высоковольтного электродвигателя переменного тока - Патент на изобретение №2415507 МПК H02P 1/26 (2006.01) Опубл. 27.03.2011 Бюл. №9
131. Сарваров А.С., Петушкин М.Ю., Стригов А.Д., Сарваров И.А., Валяева А.М. Электропривод машины центробежного литья валков по системе ТПН-АД (монография). Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010, 134с.
132. Сарваров А.С., Стригов А.Д. Моделирование пуска двухдвигательного асинхронного электропривода с последовательным соединением статорных обмоток // Электроприводы переменного тока: Тр. XIV научно-технич. конф. (13-16 марта 2007 г.) – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. – С. 197-200.
133. Сивокобыленко В.Ф., Нури А. Диагностика состояния короткозамкнутых роторов асинхронных машин//Электричество.–1997.–№3.–С. 25-26.
134. Сивокобыленко В.Ф., Павлюков В.А., Сердюков Р.П., Бондаренко В.И., Яременко С.П. Математическое моделирование асинхронных двигателей при повреждениях стержней короткозамкнутого ротора // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2009. – № 9(158). – С. 222-226.

135. Сидоров В.А. Определение технического состояния металлургического оборудования по параметрам вибрации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Донецк, 1999. – 22 с.
136. Синчук О.Н., Чумак В.В., Михайлов С.Л. Термовая модель кранового АД для диагностирования и настройки цифровой защиты от перегрузок // Электротехника. – 2003. – № 3. – С. 61-65.
137. Сипайлова Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Термовые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. – М.: Высшая школа, 1989. – 239 с.
138. Слухоцкий А.Е., Рыскин СЕ. Индукторы для индукционного нагрева. -Л.: Энергия, 1974.-264 с.
139. Смирнов В.И., Чернов Д.В. Функциональная диагностика асинхронных электродвигателей в переходных режимах работы // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – №5. – С. 52-56.
140. Соколов Р.И. Справочник по ремонту крупных электродвигателей. – М: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.
141. Стригов А.Д. Разработка модели асинхронного двигателя с учетом нелинейности намагничивания в среде «Matlab» // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2006. – Вып. 12. – С. 289-295.
142. Стригов А.Д. Электропривод машины центробежного литья валков по системе ТПН-АД с квазичастотным управлением. диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.03 . - Магнитогорск, 2009. - 149 с.
143. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
144. Татур Т.А., Татур В.Е. Установившиеся и переходные процессы в электрических цепях: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 2001.
145. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода / Л.П. Петров, О.А. Андрющенко, В.И. Капинос и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.

146. Ткачук А.А., Силуков А.Ю., Кривовяз В.К. Опыт применения преобразователя типа ПАД-В для плавного пуска высоковольтных двигателей. В сб. докл. Науч.-практ. Конф. «Проблемы и достижения в промышленной энергетике». Екатеринбург: Уральские выставки, 2006.
147. Тонких В.Г. Метод диагностики асинхронных двигателей в сельском хозяйстве на основе анализа их внешнего магнитного поля: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Барнаул, 2009. – 18 с.
148. Тонн Д.А. Анализ аналитических методов, применяемых для расчета несимметричных асинхронных машин // Электротехнические комплексы и системы управления – 2006. – №2. – С.74-76.
149. Триол АС11. Техническая документация. ЭСКО. Электронный журнал энерgosервисной компании «Экологические системы» №6, 2005.
150. Усатый Д.Ю. Исследование механических свойств АД при импульсно-частотном питании. – Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сборник научных трудов / Под ред. А.С. Карандаева. Магнитогорск: МГТУ, 1998. Вып. 4. – С. 67-73.
151. Установки индукционного нагрева: Учеб. пособие для вузов / А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Павлов Н.А. / Под ред. А.Е. Слухоцкого. -Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. -328 с.
152. Фаттахов К. М. Формула Клосса, полученная с использованием уточненной Г-образной схемы замещения асинхронной машины // Электричество. – 2005. – № 8. – С. 48-51.
153. Хрисанов В.И. Математическая модель асинхронных машин в фазных осях статора. // Электротехника. – 2004. – № 7. – С. 23-31.
154. Хрисанов В.И., Бржезинский Р. Вопросы адекватности математических моделей асинхронных двигателей при анализе переходных процессов пуска // Электротехника. – 2003. – № 10. – С. 20-25.
155. Черный А.П. Системы косвенного пуска синхронных двигателей преобразовательных агрегатов Г-Д карьерных экскаваторов. Автореферат дис... канд. техн. наук. Кривой Рог, 1991. – 19 с.

156. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / Под общ. ред. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с.
157. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. Библиогр., – М., 1996. – 276 с.
158. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
159. Штарк Г. Г. Применение вейвлетов для ЦОС. - Москва: Техносфера, 2007. - 192 с.
160. Шубенко В.А., Braslavskiy I.Ya. Тиристорный асинхронный привод с фазовым управлением. - М.: Энергия, 1972. – 200 с.
161. Шубенко В.А., Braslavskiy I.Ya., Shreyner R.T. Асинхронный электропривод с тиристорным управлением. – М.: Энергия, 1967. – 96 с.
162. Шулешко А.Н. Вибродиагностика и виброзащита оборудования и конструкций обогатительных фабрик горно-обогатительных комбинатов. Автoreферат дис... канд. техн. наук. – Иркутск, 2004. - 19 с.
163. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе / М.М. Соколов, Л.П. Петров, Л.Б. Масандилов, В.А. Ладензон. – М.: Энергия. 1967.- 198 с.
164. ABB. Системы плавного пуска. Учебное пособие. Февраль 2003.- 90 с. www.electrosite.ru/upload/iblock/e66/uchebnoe_posobie_sistemi_plavnogo_puska.pdf
165. Прайс-лист фирмы «ЕВРОСТРОЙ ИНЖИНИРИНГ» от 15 января 2006 года, www.eurosi.ru .
166. Соркинд М. Асинхронные электродвигатели 0,4 кВ. Аварийные режимы работы// Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 2(32).
167. Дьяконов В.П. MATLAB6.5 SP1/7 + Simulink5/6. Основы применения. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005.
168. Abu-Rub, H., A. Iqbal, S.K.M. Ahmed, J. Guzinski, M. Adamowicz, M. Rahiminia “Rotor broken bar diagnostics in induction motor drive using Wave-

let packet transform and ANFIS classification" in *Proc. of Int. Conf. On Electric Machines & Drives Conference*, pp. 365 – 370, May 2011.

169. Bilal Akin, Seungdeog Choi, Umut Orguner, Hamid A. Toliyat, "A Simple Real-Time FaultSignature Monitoring Tool for Motor-Drive-Embedded Fault Diagnosis Systems", *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 5, pp. 1990-2001, May 2011.

170. Aroui, T., Y. Koubaa, A. Toumi, "Magnetic coupled circuits modeling of induction machines oriented to diagnostics," *Leonardo Journal of Sciences*, vol. 7, no. 13, 103-121, July-Dec. 2008. http://ljs.academicdirect.org/A13/103_121.htm

171. Bellini, A., F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, G. B. Kliman, "Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 37, no. 5, pp. 1248-1255, Sep/Oct. 2001.

172. Bouzida, A., O. Touhami, R. Ibtiouen, A. Belouchrani, M. Fadel, A. Rezzoug, "Fault diagnosis in industrial induction machines through discrete wavelet transform," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 9, pp. 4385 – 4395, Sept. 2011.

173. Cruz, S. M. A. and A. J. Marques Cardoso, "Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park's vector approach," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 37, no. 5, pp. 1227-1233, Sept./Oct. 2001.

174. Cusido, J., L. Romeral, J.A. Ortega, J.A. Rosero, A. Garcia Espinosa, "Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 2, pp. 633 – 643, Feb. 2008.

175. Daubechies, I., "The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 36, no. 5, pp. 961-1005, Sep. 1990.

176. Deleroi, W., "Squirrel cage motor with broken bar in the rotor – physical phenomena and their experimental assessment," in *Proc. of Int. Conf. On Electrical Machines*, pp. 767-770, 1982.

177. Dorrell D.G., Thomson W.T. and Roach S. Analysis of Airgap Flux, Current and Vibration Signals as a Function of the Combination of Static and Dynamic Airgap Eccentricity in 3-Phase Induction Motors // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – Jan.-Feb., 1997. – №1. – pp. 24-34.
178. Douglas, H., P. Pillay, and A. K. Ziarani, "A new algorithm for transient motor current signature analysis using wavelets," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, no. 5, pp. 1361 – 1368, Sep./Oct. 2004.
179. Elkasabgy, N. M., A. R. Eastham, G. E. Dawson, "Detection of broken rotor bars in the cage rotor on an induction machine," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, no. 1, pp. 165-171, Jan./Feb. 1992.
180. Faiz, J., B. M. Ebrahimi, and M. B. B. Sharifian, "Time stepping finite element analysis of broken bars fault in a three-phase squirrel-cage induction motor," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 68, pp. 53-70, 2007.
181. Faiz, J., B.-M. Ebrahimi, "A new pattern for detecting broken rotor bars in induction motors during start-up," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 12, pp. 4673 – 4683, Dec. 2008.
182. Garcia-Perez, A., R. J. Romero-Troncoso, E. Cabal-Yepez, R. A. Osornio-Rios, J. de Jesus Rangel-Magdaleno, H. Miranda, "Startup current analysis of incipient broken rotor bar in induction motors using high-resolution spectral analysis," in *Proc. of IEEE Int. Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives*, pp. 657 – 663, Sept. 2011.
183. <http://ctd-krk.ru/page/proactive>
184. <http://www.mhm.assetweb.com>.
185. <http://www.technoros.spb.ru/algoritm.html>
186. Incropera F. P., D. P. de Witt, *Fundamentals of heat and mass transfer*, John Wiley & Sons Inc., New York (USA), 2nd. edition, 1985, 802 p.
187. Kechida, R., A. Menacer, "DWT wavelet transform for the rotor bars faults detection in induction motor," in *Proc. of 2nd Int. Conf. On Electric Power and Energy Conversion Systems*, pp. 1 – 5, Nov. 2011.

188. Keskes, H., A. Braham, Z. Lachiri "Broken rotor bar diagnosis in induction machines through Stationary Wavelet Packet Transform under lower sampling rate" in *Proc. of 1st Int. Conf. On Renewable Energies and Vehicular Technology*, pp. 452 – 459, March 2012.
189. Kliman, G. B. and J. Stein "Induction motor fault detection via passive current monitoring" in *Proc. of Int. Conf. Electrical Machines (ICEM'90)*, pp. 13-17, 1990.
190. Kliman, G. B., R. A. Koegl, J. Stein, R. D. Endicott, M. W. Madden, "Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 3, no. 4, pp. 873-879, Dec. 1998.
191. Kuptsov V. V., Petushkov M. Y., Sarvarov A . S. A new approach to analysis of induction motors with rotor faults during startup based on the finite element method/ Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 45, pp. 269-290, 2012. <http://www.jpier.org/pierb/pier.php?paper=12082916>
192. Kylander G., "Thermal modelling of small cage induction motors", IEEE/KHT, Power Technology Conference, Stockholm (Sweden), June 18-22, 1995, pp. 235-240.
193. Mallat, S., *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press, San Diego, CA, 1999, 2nd edition.
194. Mellor P. H., D. Roberts, D. R. Turner, "Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design", IEE Proceedings-B, Vol. 138, No. 5, September 1991, pp. 205-218.
195. Misiti, M., Y. Misiti, G. Oppenheim, and J. M. Poggi, *Wavelet Toolbox, User's Guide for Matlab*. Natick, MA: MathWorks, Jun. 2004.
196. Nandi, S. and H. A. Toliyat, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines – A Review," in *Proc. of Industry Applications Conference*, vol. 1, pp. 197 – 204, 1999.
197. Pineda-Sanchez, M., M. Riera-Guasp, J.A. Antonino-Daviu, J. Roger-Folch, J. Perez-Cruz, R. Puche-Panadero, "Instantaneous frequency of the left sideband harmonic during the start-up transient a new method for diagnosis of

broken bars,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4557 – 4570, Nov. 2009.

198. Riera-Guasp, M., J. A. Antonino-Daviu, M. Pineda-Sanchez, R. Puche-Panadero, J. Perez-Cruz, “A general approach for the transient detection of slip-dependent fault components based on the discrete wavelet transform,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 12, pp. 4167 – 4180, Dec. 2008.

199. Riera-Guasp, M., J.A. Antonino-Daviu, J. Roger-Folch, M.P. Molina Palomares, “The Use of the Wavelet Approximation Signal as a Tool for the Diagnosis of Rotor Bar Failures,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 3, pp. 716–726, May./Jun. 2008.

200. Roye D., "Modélisation thermique des machines électriques tournantes. Application à la machine à induction", Thèse de Doctorat ès Sciences, INP Grenoble (France), Novembre 1983.

201. Sadeghian, A., Zhongming Ye, Bin Wu, “Online detection of broken rotor bars in induction motors by wavelet packet decomposition and artificial neural networks,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 7, pp. 2253 – 2263, July 2009.

202. Samonig, M.A., P. Nussbaumer, G. Stojicic, T.M. Wolbank, “Analysis of rotor fault detection in inverter fed induction machines at no load by means of finite element method,” in *Proc. of 37th Annual Conf. on IEEE Ind. Electron. Society*, pp. 1758 – 1763, Nov. 2011.

203. Schneider Electric. Устройства плавного пуска и торможения Altistart 48. Каталог 2002. ART. 011237RU.

204. Sprooten, J., J. Gyselinck, J.-C. Maun, “Comparison of models of faulty induction motors: performances and applications,” in *Proc. of IEEE Int. Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives*, pp. 132 – 137, Sept. 2007.

205. Sprooten, J., J. Gyselinck, J.C. Maun, “Local and global effect of a broken bar in induction machines using fundamental electromagnetic laws and fi-

nite element simulations," in *Proc. of IEEE Int. Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives*, pp. 1 – 6, Sept. 2005.

206. Supangat, R., N. Ertugrul, W.L. Soong, D.A. Gray, C. Hansen, J. Grieger, "Broken rotor bar fault detection in induction motors using starting current analysis," in *Proc. of European Conf. On Power Electronics and Applications*, pp. 1-10, 2005.

207. Thomson W.T. A Review of On-Line Condition Monitoring Techniques for Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors – Past Present and Future // Keynote address at IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives. – Sept., 1999. – Spain. – pp. 3-18.

208. Thomson W.T. and Barbour A. On-line Current Monitoring and Application of a Finite Element Method to Predict the Level of Airgap Eccentricity in 3-Phase Induction Motors // IEEE Transactions on Energy Conversion – Dec., 1998. – №1. – pp. 347-357.

209. Thomson W.T., Rankin D. and Dorrell D.G. On-line Current Monitoring to Diagnose Airgap Eccentricity in Large 3-Phase Induction Motors – An Industrial Case History Verifies the Predictions // IEEE Transactions on Energy Conversion. – Dec., 1999. – №4. – pp. 1372-1378.

210. Thomson, W. T. and M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 26-34, Jul./Aug. 2001.

211. Thorsen V., Dalva M. Condition Monitoring Methods, Failure Identification and Analysis for High Voltage Motors in Petrochemical Industry, Proc. 8a IEE Int. Conf. – University of Cambridge, 1997. – №444. – pp. 109-113.

212. Toliyat, H. A. and S. Nandi, Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines – a review // Proceedings of the IEEE-IAS 1999 Annual Meeting. – 1999. – pp. 3-7.

213. Vaseghi, B., N. Takorabet, and F. Meibody-Tabar, "Transient finite element analysis of induction machines with stator winding turn fault," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 95, pp. 1-18, 2009.

214. Zhang, L. and T. S. Cheang, "Two new approaches to analysis of inner-fault of squirrel-cage rotor for three-phase induction motors," in *Proc. of 5th Int. Conf. On Electrical Machines and Systems*, vol. 1, pp. 51 – 55, 2001.
215. Zhang, Z., Z. Ren, and W. Huang, "A novel detection method of motor broken rotor bars based on wavelet ridge," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, no. 5, pp. 417 - 423, Sept. 2003.
216. Zouzou, S.E., S. Khelif, N. Halem, M. Sahraoui, "Analysis of induction motor with broken rotor bars using finite element method," in *Proc. of 2nd Int. Conf. On Electric Power and Energy Conversion Systems*, pp. 1-5, Nov. 2011.
217. Ordaz-Moreno, A., R. de Jesus Romero-Troncoso, J.A. Vite-Frias, J.R. Rivera-Gillen, A. Garcia-Perez, "Automatic online diagnosis algorithm for broken-bar detection on induction motors based on discrete wavelet transform for FPGA implementation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 5, pp. 2193 – 2202, May 2008.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1



Закрытое акционерное общество «КонсОМ СКС»

Юридический адрес: 455008 г. Магнитогорск, Челябинская обл. ул. Жукова д. 13.
 Почтовый адрес: 455008 г. Магнитогорск, Челябинская обл. ул. Жукова д. 13.
 Телефоны: +7 (3519) 27-23-88, 45-40-40; факс +7 (3519) 27-23-98
 ИНН 7445015325; КПП 744501001.
 e-mail: info@konsom.ru www.konsom.ru

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор
Д.В.Чистяков



СПРАВКА

о внедрении результатов исследования, полученных
 в диссертации М.Ю. Петушкива «Разработка и внедрение энерго- и
 ресурсосберегающих пусковых устройств асинхронных двигателей»

Рассмотренные на заседании совета директоров «КонсОМ» результаты, полученные М.Ю. Петушкивым в рамках диссертационного исследования на тему «Разработка и внедрение энерго- и ресурсосберегающих пусковых устройств асинхронных двигателей», имеют реальное практическое значение для предприятия. Работа выполнялась в период с 2009 по 2010 г. и была направлена на улучшение технико-экономических показателей эксплуатации электроприводов переменного тока за счет осуществления «мягкого» пуска и своевременного проактивного диагностирования оборудования.

К наиболее существенным результатам исследования относятся:

1. Разработанный способ реализации «мягкого» пуска асинхронных электроприводов в двухдвигательной системе каскадного их включения способствует дальнейшему развитию теории электромеханических систем на основе асинхронных электродвигателей и внедрен на электродвигателях насосных агрегатов.
2. Предложения по рациональному использованию имеющегося электротехнического оборудования способствует, прежде всего, повышению межремонтных сроков асинхронных двигателей за счет использования «мягкого» пуска.
3. В целом мероприятия по предложениям Петушкива М.Ю. благоприятно отразились на экономической деятельности предприятия, позволила получить положительный годовой экономический эффект в размере 1.2 млн. рублей.

Главный инженер

А.А.Шерстобитов

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

**МУНИЦИПАЛЬНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
трест "ВОДОКАНАЛ"
муниципального образования
г. МАГНИТОГОРСК**

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР

455000 ул. Советская, 30 г. Магнитогорск, Челябинской обл.,
Телефон/факс (3519)23 34 04, Электронная почта secretar@vodch.men.ru

от 15.04.2011 N 023-0ГЭ
На № от

УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер
МП трест «Водоканал»*Косарев*

**СПРАВКА
о внедрении результатов диссертационного исследования
Петушкина Михаила Юрьевича**

Результаты диссертационного исследования М.Ю. Петушкива на тему «Разработка и внедрение энерго- и ресурсосберегающих пусковых устройств асинхронных двигателей», представленного на соискание ученой степени доктора технических наук, использованы в практической деятельности МП трест «Водоканал» в виде:

1. Разработанный способ реализации «мягкого» пуска высоковольтных электродвигателей внедрен на электродвигателях насосных агрегатов №2 и №4 (6кВ, 630кВт) насосной станции №19 Янгельского водозабора.

2. Предложения по рациональному использованию имеющегося электротехнического оборудования способствует, прежде всего, повышению межремонтных сроков высоковольтных асинхронных двигателей за счет использования «мягкого» пуска.

В целом мероприятия по предложениям Петушкива М.Ю. благоприятно отразились на экономической деятельности предприятия, позволили получить положительный годовой экономический эффект в размере 1,8 млн. руб.

Главный энергетик

Косарев И.В.Косарев

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

УТВЕРЖДАЮ
Начальник ИЦП ОАО «ММК»

(подпись, дата: И.О.Ф.)
М.П.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов работ по договору № 181335 от 04.05.10 с МГТУ им. Носова
по теме: Разработка и изготовление электронного блока системы
детерминированного управления пуском высоковольтных электродвигателей
переменного тока

Краткое описание выполненной работы

Разработан и изготовлен электронный блок системы детерминированного управления пуском электродвигателей переменного тока, в котором программно реализованы оптимальные диаграммы формирования пускового напряжения на двигателе. Проведены исследования на физическом макете и уточнены параметры диаграммы пускового напряжения. Результаты исследований позволяют оценить влияние электронного блока на показатели пускового процесса.

Полученный результат

Внедрение электронного блока системы детерминированного управления пуском позволило снизить кратность пускового тока практически в два раза. Результаты компьютерной обработки электронных осциллограмм приведены в отчете. Кроме того детерминированное управление позволило в значительной степени устранить колебательность пускового момента на начальной стадии пуска и снять дополнительные динамические нагрузки в электромеханической системе.

Способность к правовой охране полученного результата

Пусковое устройство трехфазного высоковольтного электродвигателя переменного тока - патент РФ на полезную модель № 82963 Н02Р/04 (2006.01) Опубл. 10.05.09. Авторы изобретения: Сарваров А.С., Петушкин М.Ю. – МГТУ, Анисимов Д.М., Сарваров И.А. – ОАО ММК. Патентообладатель ОАО «ММК»

Дата фактического внедрения « 8 » декабря 2011г.

Срок полезного использования 2 года

Начальник ГОП ОАО ММК

В.И. Гладских

Научный руководитель
Согласовано:

А.С. Сарваров

Главный энергетик

Ю.П. Журавлев

Начальник ЦЭТЛ

В.В. Головин

Главный энергетик ГОП ОАО ММК

Д.М. Анисимов

Начальник патентно-лицензионной
группы НТЦ

В.П. Торхташ

14.12.11

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Общество с ограниченной ответственностью
«Завод решетчатого настила»



Завод решетчатого настила

Россия, 455019,
Челябинская обл., г. Магнитогорск,
проспект Промышленный, 2
тел.: +7 (3519) 58-02-77
+7-909-749-0505
E-mail: mrl505@mail.ru
www.nastilzrn.ru

Р/с 40702810325490004621 в филиале № 8602 ВТБ24 (ЗАО) г. Екатеринбург • к/с 301018100000000905 • БИК 046568905
• ИНН 7445044848 • ОКПО 61334100

«06 » декабря 2014 г. № 12
на № _____ от _____

СПРАВКА

о внедрении в производственный процесс в цехах завода решетчатого настила г.Магнитогорск результатов диссертационной работы Петушкива Михаила Юрьевича «Повышение ресурсоэффективности эксплуатации высоковольтных асинхронных электроприводов промышленного производства», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03. – электротехнические комплексы и системы

Соискателем диссертационной работы получены результаты, имеющие научно-практическую значимость в рамках создания нового класса пусковых трансформаторно-тиристорных пусковых устройств.

Результаты диссертационного исследования Петушкива М.Ю. использованы в практической деятельности предприятия в виде:

Технического задания на разработку пусковых устройств для высоковольтных асинхронных электроприводов вентиляторной станции мощностью 630 кВт 10 кВ, с применением трансформаторного пускового устройства. Трансформаторные пусковые устройства внедрены на трех двигателях вентиляторной станции в сентябре 2012г.

Использование результатов диссертационной работы позволило получить экономический эффект в размере 2300 тысяч рублей, снижением затрат на приобретение пусковых устройств и 1300 тысяч рублей за счет увеличения межремонтного периода по текущим и средним ремонтам электродвигателей.

Генеральный директор
000 «Завод решетчатого настила»

М.Л.Рыкант



ПРИЛОЖЕНИЕ 5



По месту требования

**Справка
о внедрении результатов диссертационного исследования.**

На настоящим письмом ОАО «Новокалинский ГОК» подтверждает, что результаты диссертационного исследования Петушкива Михаила Юрьевича «Повышение ресурсоэффективности эксплуатации высоковольтных асинхронных электроприводов промышленного производства» были внедрены в хозяйственной деятельности нашего предприятия и в настоящее время используются в производственной деятельности.

В частности внедрены:

- трансформаторные пусковые устройства для четырех высоковольтных асинхронных двигателей 630 кВт, 6 кВ вытяжной вентиляции;
- методика диагностирования асинхронных двигателей, позволяющая использовать проактивное обслуживание машин и агрегатов горно-обогатительного производства;
- суммарный экономический эффект составляет 2800 тыс. рублей.

Главный инженер
ОАО «Новокалинский ГОК»



/ А.С. Мальцев/