

**Публичное акционерное общество
«Научно-исследовательский проектно-конструкторский и
технологический институт электромашиностроения»**

На правах рукописи



ЗАХАРОВ АЛЕКСЕЙ ВАДИМОВИЧ

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА И
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО
ТОКА ДЛЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

**Диссертация
на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор
Малафеев Сергей Иванович

Владимир 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Современное состояние и актуальные задачи совершенствования мехатронных систем для промышленности и транспорта	20
1.1 Структуры и перспективные компоненты мехатронных систем	20
1.2 Параметры силовых компонентов мехатронных систем	24
1.3 Повышение энергетической эффективности мехатронных систем	32
1.4 Материалосбережение в мехатронных системах	36
1.5 Повышение надежности мехатронных систем и их компонентов	38
1.6 Эволюционные аспекты развития мехатроники	40
Выводы, постановка задачи и определение методов исследования	41
Глава 2. Разработка основных положений и методики энергетического расчета мехатронных систем	43
2.1 Основные задачи и этапы энергетического расчета	44
2.2 Разработка алгоритма проектирования электродвигателей переменного тока для мехатронных систем	46
2.3 Основы создания серии двигателей переменного тока для промышленных мехатронных систем	53
2.4 Выводы по главе 2	74
Глава 3. Разработка и исследование математических моделей электродвигателей переменного тока для мехатронных систем.....	76
3.1 Математическое описание электрического двигателя в составе мехатронной системы	77
3.2 Математические модели асинхронного двигателя	77
3.3 Математические модели вентильно-индукторного двигателя	93
3.4 Математические модели тепловых процессов в силовых компонентах мехатронных систем	101
3.5 Выводы по главе 3	105

Глава 4. Проектирование и энергетический расчет мехатронных систем по скоростным характеристикам	107
4.1 Скоростные характеристики электродвигателей мехатронных систем	107
4.2 Расчет скоростных характеристик регулируемого асинхронного электродвигателя	111
4.3 Расчет скоростных характеристик регулируемого вентильно-индукторного электродвигателя	119
4.4 Расчет тепловых и предельных нагрузочных характеристик	125
4.5 Расчет тепловых характеристик в циклических режимах работы.....	141
4.6 Выводы по главе 4	144
Глава 5. Оптимальный синтез системы электропитания электрических двигателей переменного тока в мехатронных системах	146
5.1 Цели и критерии оптимизации	147
5.2 Исследование оптимальных режимов асинхронного двигателя при частотном управлении	148
5.3 Исследование оптимальных режимов вентильно-индукторных электродвигателей	161
5.4 Исследование и минимизация энергопотребления асинхронного электродвигателя в переходных режимах	170
5.5 Исследование и минимизация энергопотребления при циклических режимах работы	180
5.6 Комплексная процедура оптимизации системы на примере двигателей лифтовой лебедки	186
5.7 Выводы по главе 5	195
Глава 6. Конструирование двигателей для мехатронных систем	198
6.1 Исследование влияния конструкции электродвигателя на потери	200
6.2 Оптимальное конструирование электродвигателей для мехатронных систем	213
6.3 Выводы по главе 6	223

Глава 7. Техничко-экономический анализ проектных вариантов электрических двигателей переменного тока для мехатронных систем	224
7.1 Критерии технико-экономического анализа	225
7.2 Исследование перегрузочной способности двигателя	234
7.3 Экономическая оценка и методика выбора вариантов двигателя мехатронной системы	238
7.4 Выводы по главе 7	244
Глава 8. Практическое применение и результаты разработки мехатронных систем для промышленности и транспорта	246
8.1 Разработка программного обеспечения автоматизированного проектирования и моделирования электрических двигателей для мехатронных систем	246
8.2 Разработка серий асинхронных двигателей для частотного регулирования	260
8.3 Разработка специальных двигателей для гибридных транспортных средств	268
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	275
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	279
Список используемых сокращений	299
Приложение 1	301
Приложение 2	305

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Глобальная задача повышения эффективности использования материальных и энергетических ресурсов в XXI веке ориентирует развитие технических систем в направлении их совершенствования при снижении энергетических потерь, уменьшении материалоемкости элементов и повышении надежности [17, 24, 67, 117, 151, 174]. Мехатронные системы являются крупными потребителями электроэнергии, и обозначенная тенденция повышения эффективности для них наиболее актуальна. Перспективными электромеханическими преобразователями для мехатронных систем являются двигатели переменного тока, в первую очередь, асинхронные машины. Все основные характеристики систем закладываются, как известно, при проектировании [67, 153, 174, 175, 178, 181, 209, 220]. Основы современных положений проектирования машин переменного тока в нашей стране были сформулированы в работах известных специалистов: В.Я. Беспалова, О.Д. Гольдберга, И.П. Копылова, А.Э. Кравчика, Б.И. Кузнецова, Е.М. Лопухиной, Л.Н. Макарова, И.М. Постникова, В.И. Радина, Т.Г. Сорокера, П.С. Сергеева и многих других. Вопросам исследования и расчета компонентов автоматизированных электроприводов и мехатронных систем посвящены работы И. Я. Браславского, Д.А. Буга, А.Е. Загорского, Н.Ф. Ильинского, В.И. Ключева, В.А. Кузнецова, П.С. Мелкозерова, В.А. Полковникова, Б.К. Чемоданова, Р. Т. Шрейнера Ю.Г. Шакаряна и других. В результате к началу XXI века был накоплен и обобщен значительный научный опыт в области электромеханики, электропривода постоянного и переменного тока.

Современный этап развития промышленной и транспортной техники характеризуется значительным и постоянно увеличивающимся объемом использования частотно-регулируемых электродвигателей переменного тока, в первую очередь, низковольтных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Расширение области применения асинхронных машин в составе регулируемого электропривода в конце прошлого века было обусловлено

решением соответствующей актуальной научной проблемы и проявилось в изменении конструкции регулируемых электродвигателей, а именно, в изменении пазово-зубцовой геометрии, схем обмоток, системы вентиляции, подшипниковых опор, улучшении характеристик изоляции и других конструктивных модификациях. Производство электрических машин на основе реализации такого подхода в настоящее время в России представлено сериями низковольтных частотно-регулируемых асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором: АДЧР, 7FMTK, АЧ и др. [16, 33, 67, 68, 80, 107, 191, 211, 212, 215]. Зарубежные электротехнические компании: *ABB, Emerson, General Electric, Siemens, VEM, WEG* и др. выпускают асинхронные двигатели, предназначенные для работы с преобразователями частоты. Характеристики таких машин регламентированы *IEC 60034-17, IEC 60034-25*.

Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, а также промышленная эксплуатация мехатронных систем с двигателями переменного тока свидетельствуют, что основным направлением дальнейшего повышения их технических характеристик при широких диапазонах регулирования частоты вращения, изменения нагрузок, в том числе при рекуперации энергии, является увеличение степени взаимного согласования характеристик всех компонентов системы [24, 27, 36, 65, 72, 76, 145, 174, 251, 252, 293].

Конструктивные модификации, применяемые в серийно выпускаемых частотно-регулируемых двигателях, обеспечили их работоспособность в большинстве режимов, однако не позволили достичь максимальной эффективности работы в составе мехатронных систем. Это обусловлено влиянием алгоритмов управления на энергетические показатели и диапазон регулирования, ограниченными характеристиками источника электропитания, потерей работоспособности двигателей в некоторых режимах, значительным ростом добавочных потерь в высоконагруженных машинах [24, 23, 59, 67, 82, 83, 230, 234, 284]. При этом в большинстве случаев получение заданных характеристик достигается путем простого увеличения запасов по мощности.

Основу традиционного проектирования электрических машин, применявшегося и развивавшегося на протяжении последних 50 лет, составляет решение оптимизационной задачи, при которой для номинального режима работы обеспечивается минимизация массы или себестоимости активных частей, приведенных затрат [7, 45, 58, 88, 181, 186, 215]. Таким образом, обеспечиваются экстремумы КПД, потерь, тепловых нагрузок в номинальном режиме (при номинальных значениях момента, тока, амплитуды и частоты питающего напряжения с учетом требований к качеству электроэнергии).

Для электродвигателей, работающих в составе мехатронных систем, изменяется понятие номинального режима: электрическая машина всегда работает при переменной частоте вращения в широком диапазоне изменения нагрузки, тока, амплитуды и частоты напряжения. При этом в широком диапазоне изменяются параметры двигателя, при определенных сочетаниях параметров возможно нарушение устойчивой работы, в разы изменяются потери в элементах машины, а ее энергетические характеристики зависят от алгоритмов и технических средств управления, режима работы: разгона, вращения под нагрузкой, на холостом ходу, рекуперации энергии. Усложняется тепловой режим машины, и возрастают нагрузки на ее изоляцию [3, 11, 16, 18, 20, 24, 59, 65-68, 75, 137].

Новые технологии и методики проектирования должны обеспечивать достижение наилучших энергетических показателей электрической машины во всем диапазоне регулирования частоты вращения и электромагнитного момента с учетом алгоритмов управления и ограничений. Такая задача не имеет однозначного решения и предполагает формирование базы данных, содержащей критерии оптимизации, оценки эффективности электромеханического преобразования энергии в двигательном и генераторном режимах, предельные характеристики машин, зависимости энергетических, механических, регулировочных характеристик, полученных при вариациях значений параметров активной части и алгоритмов управления.

Следовательно, разработка электрических машин для мехатронных систем должна выполняться с учетом режимов работы, алгоритмов управления, характеристик нагрузок и обеспечивать наилучшую степень согласования электродвигателя со всеми компонентами системы. В настоящее время отсутствуют не только методики такого проектирования, но и нет концепции для определения критериев оптимизации, ограничений, спецификации исходных данных и расчетных характеристик. Таким образом, противоречие между возрастающими требованиями к характеристикам двигателей переменного тока, предназначенным для работы в новых условиях, а именно, в составе мехатронных систем, с одной стороны, и отсутствием научно обоснованных решений для обеспечения эффективного преобразования энергии в мехатронных системах на этапе проектирования двигателей переменного тока, с другой стороны, определяет актуальную **научную проблему** создания теории и прикладных методов повышения эффективности электромеханического преобразования энергии в электрических машинах переменного тока при их функциональном и конструктивном объединении с электронными преобразователями, источниками электропитания, механическими передачами и информационно-управляющими компонентами в составе мехатронных систем. Решение этой проблемы обеспечит формирование новой методологии проектирования электрических машин переменного тока, которая позволит:

- снизить материалоемкость электромеханических преобразователей и увеличить их энергоэффективность;
- сократить сроки и финансовые затраты на разработку двигателей;
- повысить технический уровень мехатронных систем и их силовых компонентов.

Цель работы: Повышение эффективности преобразования энергии и использования активных частей электрических машин переменного тока, работающих в составе мехатронных систем, на основе увеличения уровня со-

гласования характеристик машины и взаимодействующих с ней силовых и информационных компонентов на этапе проектирования.

Для достижения поставленной цели необходимо разработать математические модели основных процессов в электрических машинах, работающих в составе мехатронных систем, и на их основе разработать методики расчета и проектирования электродвигателей переменного тока с учетом взаимного влияния управляющих, электромагнитных, электромеханических и тепловых процессов. Таким образом, в работе необходимо решить следующие задачи:

1. Провести исследование и разработать уточненные математические модели, отражающие электромагнитные, электромеханические, тепловые и управляющие процессы в мехатронных системах с двигателями переменного тока, ориентированные на использование для ее энергетического анализа и синтеза.

2. Исследовать режимы работы электродвигателей переменного тока в составе мехатронных систем при широких диапазонах регулирования скоростей и нагрузок и на основе полученных результатов:

- разработать методики расчета зависимостей основных энергетических показателей (длительного и кратковременного моментов, тока, потерь, КПД) от частоты вращения – скоростных характеристик;

- разработать способы учета алгоритмов управления электромеханическим преобразованием при расчете скоростных характеристик;

- разработать методику энергетического расчета мехатронных систем с использованием скоростных характеристик.

3. Исследовать влияние параметров активной части (главных размеров, пазово-зубцовой геометрии и обмоточных данных) на характеристики электродвигателей в широком диапазоне регулирования и на основе этих исследований:

- разработать методику проектирования активных частей электрических машин переменного тока для мехатронных систем;

- разработать и обосновать критерии оптимизации параметров питания регулируемых электродвигателей переменного тока в составе мехатронных систем;

- разработать критерии и выбрать методы оптимизации геометрии активных частей электродвигателей переменного тока для мехатронных систем.

4. Исследовать влияние конструктивных частей и элементов электрической машины на её энергетические характеристики, и разработать методы снижения этого влияния.

Работа выполнялась в ПАО «Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения» (ПАО «НИПТИЭМ»), г. Владимир, в период с 2005 г. по 2015 г. и соответствует направлению «Энергетика и энергосбережение» перечня приоритетных направлений, а также «Технология энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии», утвержденного Президентом Российской Федерации 21.05.2006 г.

Проведению исследований по данной тематике способствовало выполнение договорных НИР и ОКР по темам:

1. «Создание методологии проектирования и разработка электромагнитного ядра асинхронных электродвигателей габаритов 112-315мм для частотно-регулируемого привода широкого применения».

2. «Разработка экспериментального образца комплекта тягового силового электрооборудования машины гусеничной».

3. «Создание безредукторных приводов для лифтов грузоподъемностью до 1000кг», госконтракт №8/З-686 Н-09.

4. Работы по федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», 2010-2012 гг., (государственный контракт П-236).

Методы исследования. В работе использовались современные и классические методы научных исследований, в том числе, методы аналитической

механики, электротехники, электромеханики, теории автоматического управления. При исследовании процессов в компонентах мехатронных систем использовалось компьютерное моделирование с помощью пакетов прикладных программ: *MATLAB*, *ANSOFT Maxwell*, СПРУТ-АЭД. Экспериментальные исследования проводились на основе сертифицированного оборудования и апробированных методик в испытательном центре и исследовательских лабораториях ПАО «НИПТИЭМ».

Достоверность полученных научных результатов определяется корректностью постановок задач, обоснованностью принятых допущений, использованием апробированных методов, а также экспериментальным подтверждением основных теоретических выводов и адекватности предложенных моделей.

Научная новизна

1. Показано, что исследование и проектирование мехатронных систем с двигателями переменного тока, работающими в широких диапазонах изменения частоты вращения и нагрузки, должны проводиться на основе энергетического расчета, основанного на исследовании основных электромеханических характеристик системы в заданном диапазоне управляющих и возмущающих, статических и динамических воздействий. Сформулирована концепция и разработана методика проектирования и энергетического расчета электрических машин переменного тока для мехатронных систем по критерию эффективного использования энергетических компонентов системы – двигателя и инвертора.

2. Разработаны основные положения энергетического расчета мехатронных систем с электродвигателями переменного тока – асинхронными и вентильно-индукторными, обеспечивающие проектирование электрических машин с оптимальным сочетанием параметров, определяющим соответствие ее регулировочных, энергетических и массогабаритных показателей при работе в составе мехатронных систем в заданной области скоростей и нагрузок.

3. Разработаны методики расчета электромеханических характеристик и проектирования электродвигателей переменного тока (асинхронных и вентильно-индукторных), регламентирующие поверочные и проектные расчеты с учетом их работы в системах векторного и скалярного управления частотой вращения и моментом машины. При этом разработана новая методика поверочного электромагнитного расчета, позволяющего вычислять данные для скоростных характеристик системы – зависимостей основных электромеханических и тепловых характеристик от частоты вращения с учетом алгоритмов управления частотой вращения, моментом, током, магнитным потоком.

4. Предложена, проверена и подтверждена гипотеза, объясняющая существенное увеличение магнитных потерь в высоконагруженных электродвигателях за счет вытеснения магнитного потока из шихтованного ярма в нешихтованную станину. На основе обобщения результатов теоретических и экспериментальных данных выведены формулы для расчета этих потерь.

5. Разработаны и исследованы уточненные математические модели электродвигателей переменного тока (асинхронных и вентильно-индукторных) в составе мехатронных систем, ориентированные на анализ электромеханических свойств в процессе управления. В моделях отражено изменение параметров двигателя от эффектов насыщения и вытеснения тока при широком диапазоне изменения магнитного потока, частоты вращения и нагрузки с помощью нелинейных характеристик составляющих магнитной и электрической цепей электрической машины путем их представления зависимостями от одного или двух аргументов сплайном третьего порядка, данные для которого вычисляются при поверочном электромагнитном расчете.

6. Для анализа неустановившихся процессов нагрева критических компонентов электродвигателей переменного тока (обмотки статора, ротора, сердечника статора) разработана трехмассовая динамическая тепловая модель, основанная на использовании тепловых схем замещения, эффективная для моделирования закрытых обдуваемых асинхронных двигателей с ВОВ 80-315мм, $2p=2-12$.

7. Разработана систематизированная информационная база данных машин переменного тока, содержащая аналитические зависимости для предварительного определения главных размеров и параметров пазово-зубцовой геометрии электродвигателей для мехатронных систем. База данных электрических машин представляет развитие традиционного подхода к проектированию, основанного на использовании машинных постоянных.

8. Предложены методики оптимизации режимов энергопитания, ориентированные на использование при программировании систем управления для асинхронных и вентильно-индукторных двигателей по критериям уменьшения потерь или нагрева критических элементов электрической машины, основанные на коррекции магнитного потока для асинхронного двигателя и мгновенного значения тока фазы для вентильно-индукторного двигателя. Разработан способ коррекции параметров настройки регулятора скорости для повышения КПД и снижения скорости нагрева обмотки статора в динамических режимах работы.

9. Разработана методика оптимального конструирования электромашинной части мехатронной системы по стоимостному критерию, использующая метод динамического программирования и дискретное уравнение Беллмана.

Практическая значимость работы

- Предложенная в работе методика энергетического расчета и проектирования двигателей переменного тока для мехатронных систем позволила увеличить эффективность проведения НИР и ОКР за счет снижения временных, трудовых и ресурсных затрат, при изготовлении макетных образцов, проведении натурных испытаний и физического моделирования электрических машин.

- Разработанные новая методика, алгоритмы и программы поверочного электромагнитного расчета позволяют полностью автоматизировать вычисление скоростных характеристик и процедуру поиска оптимальных параметров электропитания при заданных нагрузках и частотах вращения.

- Разработанные математические модели асинхронных и вентильно-индукторных двигателей, ориентированные на исследование мехатронных систем, позволяют существенно повысить точность расчетов в сравнении с известными моделями, основанными на теории цепей, без увеличения временных затрат при моделировании.

- Разработанная методика расчета добавочных потерь в оболочке электрической машины позволяет повысить точность расчетов энергетических характеристик электродвигателя. При этом погрешность вычисления КПД за счет учета добавочных магнитных потерь холостого хода, возникающих в статорах высоконагруженных электродвигателей, снижается на величину до 2%.

- Разработанная информационная база данных для энергетического расчета и проектирования электродвигателей для мехатронных систем позволяет повысить эффективность выбора базовых компонентов системы (электрической машины, силового преобразователя). При этом предполагается, что разработка осуществляется на основе постепенной модификации двигателя от базовых характеристик к требуемым параметрам.

Внедрение и практическая реализация результатов

Методика энергетического расчета и проектирования электродвигателей переменного тока внедрена и используется на предприятиях российского электротехнического концерна «Русэлпром» и применялась на предприятиях: «Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения» (ПАО «НИПТИЭМ» г. Владимир), ООО «Русэлпром-Мехатроника» (ранее ООО «ВЭМЗ-Спектр» г. Владимир). Применение методики энергетического расчета было одобрено научно-техническим советом концерна. Компоненты расчетного инструментария методики поставлены на «Сафоновский электромашиностроительный завод» (ООО «Русэлпром-СЭЗ») г. Сафоново, ООО «Русэлпром-Электропривод» г. Москва. С использованием методики энергетического расчета и ее компонентов были реализованы проекты по контрактам и заказам Министерства обороны РФ, ОАО «РЖД», ОАО «Концерн ПВО Алмаз-Антей»,

ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (г. Санкт-Петербург), ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского» (г. Жуковский), ОАО «НПО «Сатурн» (г. Рыбинск), ООО Компания «Объединенная Энергия» г. Москва.

Основные положения методики энергетического расчета и проектирования электрических двигателей переменного тока обсуждались на рабочем совещании по формированию предложений для включения в программу приоритетных работ по развитию ключевых технологий, необходимых для создания робототехнических комплексов нового поколения (Москва, 31.10.2014).

Результаты работы были использованы при разработке частотно-регулируемых крановых электродвигателей, серийно выпускаемых на Владимирском электромоторном заводе ООО «ПК «ВЭМЗ»; вентильно-индукторных двигателей для нужд ЖКХ: ВИД80-2Н, ВИД90-2Н производства ПАО «НИПТИЭМ» (г. Владимир); частотно-регулируемых лифтовых приводах, серийно выпускаемых в ПАО «НИПТИЭМ» и ООО «ПК «ВЭМЗ»; двигателях комплекта электрических машин тягового электрооборудования для гибридного городского автобуса 12м, установленных на автобусах ВИТОВИТ-А420 и БОГДАН-А70522, рольганговых двигателях производства ОАО «НИПТИЭМ»; частотно-регулируемых электродвигателях шарошечных станков СБШ 200, СБШ250 производства РУДГОРМАШ (г. Воронеж) ; тяговых двигателях, серийно выпускаемых ПАО «НИПТИЭМ» для вагона 81-760/761 метропоезда; электродвигателях серии 7AVE «Стандарт+», выпускаемых ООО «ПК «ВЭМЗ»; частотно-регулируемых двигателей для мехатронных комплексов карьерных экскаваторов ЭКГ-10М, ЭКГ-18М.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Уточненные математические модели асинхронных и вентильно-индукторных электродвигателей, учитывающие нелинейные характеристики элементов схемы замещения с помощью интерполяционного сплайна и ориентированные на исследование электромагнитных, электромеханических и

управляющих процессов при проведении энергетических расчетов силовых компонентов мехатронной системы.

2. Методика энергетического расчета и проектирования двигателей переменного тока, позволяющая повысить эффективность использования энергетических и материальных ресурсов системы на основе увеличения уровня согласования характеристик силовых и информационных компонентов.

3. Научные основы и методика проектирования электродвигателей переменного тока и выбора силовых компонентов при энергетическом расчете мехатронных систем.

4. Аналитические соотношения и методика расчета предельных нагрузочных характеристик регулируемых низковольтных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, положенные в основу расчета параметров для ТУ16-13 (в соответствии с требованием ГОСТ Р МЭК/ТС 60034-17, IEC 60034-25) на частотно-регулируемые двигатели АДЧР, 7FMTK производства ООО«ПК «ВЭМЗ».

5. Методика оптимизации параметров питания по критерию эффективного использования энергетического ресурса машины переменного тока.

6. Способ нелинейного токового управления вентильно-индукторными двигателями, позволяющий снизить пульсации момента и за счет этого увеличить срок службы подшипникового узла машины.

7. Методика расчета добавочных потерь в конструктивных элементах электрической машины переменного тока.

8. Методика оптимального конструирования силовой части мехатронной системы с двигателем переменного тока по стоимостному критерию.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 20 научно-технических конференциях, семинарах и совещаниях, в том числе:

1. Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVI, XVII, XVIII Бенардосовские чтения)» (Иваново, 2009, 2013, 2015 гг.).

2. VI, VII Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП -2010, 2012 (Тула, 2010 г., Иваново, 2012 г.).

3. Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты (МКЭЭЭ – 2008, 2010, 2012, 2014)» (Алушта, 2008, 2010, 2012 гг.).

4. XIV, XV, XVI научно-технических конференциях «Электроприводы переменного тока» ЭПТ-2007, 2012, 2015 (Екатеринбург, 2007, 2012, 2015 гг.).

5. III, V Международных научно-технических конференциях «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы» (Екатеринбург, 2007, 2011 гг.).

6. XIV, XV, XVI Международных научно-технических конференциях «Вычислительная механика и современные прикладные программные системы» (Алушта, 2005, 2007, 2009 гг.).

7. Международной научной конференции «Дифференциальные уравнения и динамические системы» (Суздаль, 2006, 2008 гг.).

8. Международной научной конференции «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (Тольятти, 2009 г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 54 научных работы, в том числе, монография, 22 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, из них 12 статей в журналах, индексируемых в базе научного цитирования Scopus, получено 2 патента РФ.

Объём работы. Диссертация изложена на 312 страницах машинописного текста, содержит введение, восемь глав, заключение, список литературы из 295 именований, 2 приложений на 12 листах и иллюстрируется 111 рисунками.

В первой главе работы рассмотрены структура и компоненты мехатронных систем с электродвигателями переменного тока. Особенное внимание уделено исследованию особенностей работы электрической машины переменного тока в мехатронной системе. На основании анализа современного

состояния вопросов проектирования и применения электродвигателей в мехатронных системах сформулирована цель и задачи работы.

Вторая глава работы посвящена разработке метода энергетического расчета мехатронных систем с двигателями переменного тока. Разработаны методики проектирования электродвигателей для мехатронных систем в рамках энергетического синтеза системы. Сформулированы требования к методам проектирования электрических машин на этапах энергетического расчета. Проведено эскизное проектирование серии низковольтных частотно-регулируемых асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, ориентированной на использование машин из ее состава в качестве базового варианта электромеханического преобразователя мехатронной системы.

Третья глава посвящена разработке уточненных математических моделей асинхронных и вентильно-индукторных двигателей, ориентированных на моделирование электромеханических и тепловых процессов в мехатронных системах. Для компьютерного моделирования электромеханических процессов в мехатронных системах, представляемых на основе метода пространства состояний, использованы модели с сосредоточенными параметрами, записанные в естественных фазных координатах.

Четвертая глава посвящена разработке методик расчета скоростных характеристик асинхронных и вентильно-индукторных электродвигателей. Разработаны методики расчета зависимостей тепловых и электромеханических характеристик от частоты вращения. Классические методики поверочных электромагнитных расчетов дополнены процедурами учета алгоритмов управления магнитным потоком, током и частотой вращения.

В пятой главе показано влияние алгоритмов управления на электромеханические и тепловые характеристики электродвигателя. Предложены методики оптимизации параметров электропитания по критерию минимизации функционалов, отражающих потери и нагрев критических элементов машины, при ограничениях на ресурсы системы. Приведены примеры оптимального проектирования двигателей для мехатронных систем.

Шестая глава посвящена учету добавочных потерь в станинах высоконагруженных электрических машин. Предложена, проверена и подтверждена гипотеза о причинах возникновения добавочных потерь холостого хода в оболочке высоконагруженных электродвигателей. Разработана методика оптимального конструирования машинной части мехатронной системы по стоимостному критерию.

В седьмой главе исследована методика разработки электродвигателей для мехатронной системы, основанная на использовании специализированной базы данных, сформированной из обобщения конструкторских документов и протоколов испытаний соответствующих асинхронных двигателей. Для экономической оценки проектного варианта использован метод эквивалентного приведения стоимости компонентов электрической машины и преобразователя частоты к условной единице, равной стоимости 1 кг меди.

Восьмая глава работы посвящена практическому использованию результатов работы в промышленности и на транспорте. Приведены примеры разработанных программ для ЭВМ. Рассмотрены технические характеристики, показаны фотографии и общие виды электродвигателей, разработанных с использованием предлагаемых методик. Дана оценка общего технического уровня новых изделий и эффективность предложенного подхода к проектированию.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Приложение содержит 6 актов о внедрении результатов работы, а также таблицы, демонстрирующие общий вид баз данных, используемых для разработки электродвигателей переменного тока для мехатронных систем.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТРАНСПОРТА

Повышение технических характеристик – важная задача совершенствования мехатронных систем. Одним из наиболее востребованных направлений мехатроники является направление, использующее электромеханическое преобразование энергии для создания управляемого движения рабочего органа. В этом случае мехатронная система отличается конструктивным и функциональным объединением электромеханических, энергетических и информационно-управляющих компонентов с высоким уровнем организации управления.

1.1 Структуры и перспективные компоненты мехатронных систем

Структура мехатронной системы включает в себя электромеханический преобразователь (ЭМП), механическую передачу (МП), силовой преобразователь (СП), систему управления (СУ) и может быть представлена схемой, показанной на рис.1.1.

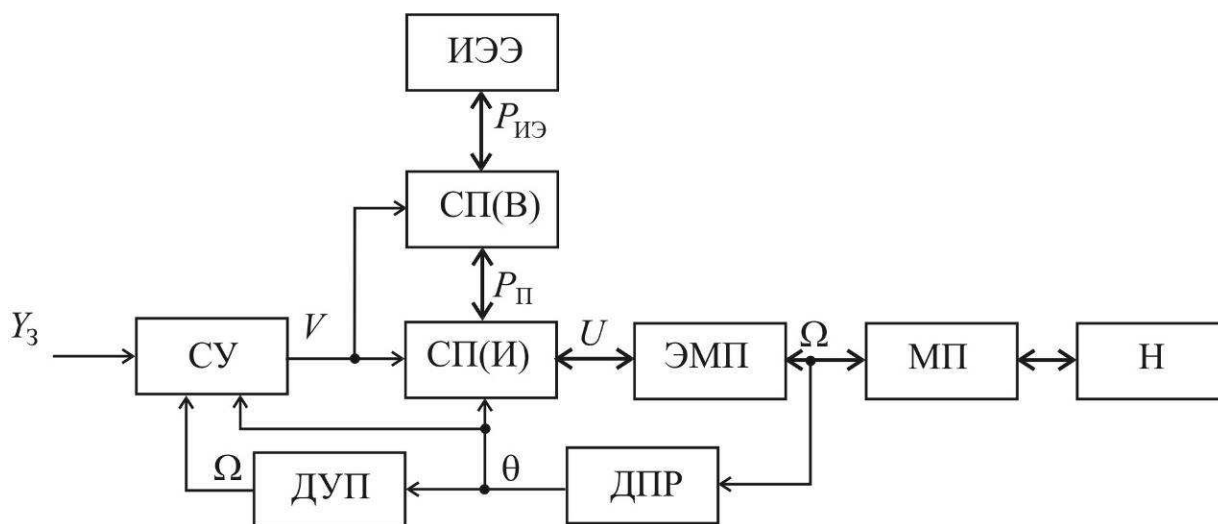


Рис. 1.1. Общая структура мехатронной электромеханической системы

Назначение такой мехатронной системы может быть охарактеризовано, как управляемое электромеханическое преобразование энергии, получаемой от

источника электропитания (ИЭЭ), необходимое для создания движения с заданными параметрами в нагрузке (Н). Для обеспечения заданных параметров движения рабочего органа такая мехатронная система должна обладать высоким уровнем организации управления электромеханическим преобразованием, для чего в ней необходимо применение многоконтурного микропроцессорного управления, использующего соответствующие датчики положения ротора (ДПР), датчик угловых перемещений (датчик частоты вращения) (ДУП). Датчики положения ротора и частоты вращения (угловых перемещений) могут заменяться соответствующими наблюдателями (вычислителями). В системах с двигателями переменного тока целесообразно разделить силовой преобразователь на выпрямитель и инвертор (СП(В) и СП(И) соответственно). Блоки структуры связаны между собой следующими параметрами: Y_3 – заданный параметр (Ω_3 – заданная угловая частота вращения; M_3 – заданный электромагнитный момент на валу; θ_3 – заданная угловая координата ротора); Ω – угловая частота вращения вала; θ – угловая координата вала; $P_{ИЭ}$ – электрическая мощность источника; $P_{П}$ – преобразованная электрическая мощность; V – матрица управляющих воздействий; U – матрица фазных напряжений.

Мехатронная система, построенная на основе электромеханического преобразования энергии, может быть схематично разделена на энергетический и информационно-управляющий уровень, а также на машинную и электронную части, так, как это проиллюстрировано на рис. 1.2.

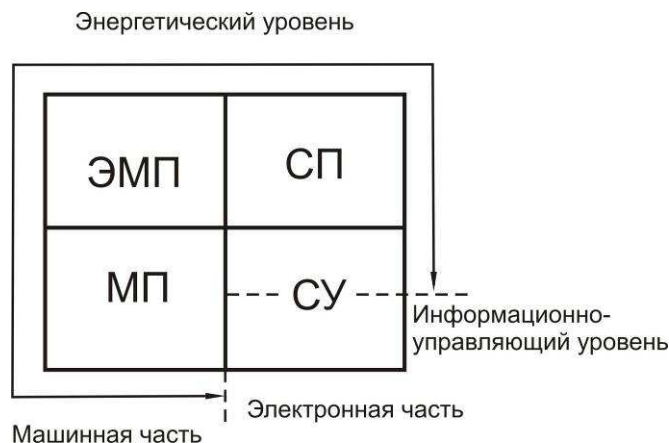


Рис. 1.2. Схематичное представление уровней мехатронной электромеханической системы

Очевидно, что силовые и энергетические характеристики мехатронной системы в первую очередь определяются свойствами элементов, входящих в энергетический уровень, т.е. машинной частью системы и силовым преобразователем. Алгоритмы управления электромеханическим преобразованием энергии в мехатронной системе также влияют на энергетические характеристики, их воздействие сильное, но не определяющее и проявляется в основном в динамических режимах. Поэтому энергетический расчет мехатронной системы имеет первый приоритет при проектировании, а просчеты, допущенные на этапе разработки элементов энергетического уровня, невозможно компенсировать за счет модификации алгоритмов управления. Это ведет к необходимости перепроектирования машин и силового преобразователя, стоимость разработки и изготовления которых велика и может составлять 80-90% от стоимости всей мехатронной системы.

Центральным элементом электромеханической мехатронной системы является электродвигатель, так как именно он выполняет преобразование энергии. Остальные элементы системы также важны, однако они выполняют вспомогательные функции – управляют электромеханическим преобразованием, обеспечивают электродвигатель необходимым потоком энергии, преобразовывают параметры и форму движения. Поэтому задачи энергетического расчета и проектирования силовых компонентов мехатронной системы целесообразно решать, начиная с рассмотрения процесса электромеханического преобразования.

Разработанные методики исследования и расчета электрических машин [2, 44, 64, 88, 90, 99, 109, 116, 158, 159, 188, 215, 231, 242, 243], основы проектирования серий электрических машин [7, 19, 28, 58, 107, 121, 186, 191, 196, 198, 215], а также методы моделирования полей и процессов в электрических машинах [91-93, 98, 111, 113, 114, 127, 171, 213, 214, 235] составляют незыблемую основу электромеханики для современных специалистов. Однако изменения, произошедшие в конце 20 – начале 21 веков в сфере силовой электроники и кибернетики, заставляют изменить взгляд на представление

электрической машины, не в части базовых методов расчета и моделирования процессов электромеханического преобразования, а в части представления ее режимов работы, характеристик, подходов к проектированию. Предпосылками для изменения указанных сложившихся представлений стало широкое внедрение регулируемого электропривода переменного тока в промышленность и на транспорте.

Содержание необходимости изменения подходов расчета и проектирования электрических машин для регулируемого электропривода и мехатронных систем заключается в том, что традиционные методики используемые при их разработке [1, 6, 25, 26, 27, 31, 35, 104, 123] не позволяют отражать важнейшие электромеханические характеристики двигателей в необходимом диапазоне регулирования. Не учитывают особенности алгоритмов управления, нагрузки, а также физические ограничения, накладываемые на фазные напряжения и токи, их нелинейные искажения. Традиционные методы проектирования не позволяют разрабатывать машины в части выбора главных размеров, параметров пазово-зубцовой геометрии и обмоточных данных, с учетом диапазона регулирования и алгоритмов управления. При этом современные способы управления частотой вращения, моментом и током электродвигателей переменного тока, построенные на основе теории векторного управления, не интегрируются в методики проектного и поверочного расчетов электрических машин. Критические режимы работы электрических машин, проявляющиеся в возникновении крутильных колебаний, неравномерного вращения и связанные с алгоритмами управления, доступны только при компьютерном моделировании системы, но не доступны в поверочных расчетах. В свою очередь критические электромагнитные и энергетические характеристики, доступные при поверочном электромагнитном расчете, не эффективно рассчитывать с помощью компьютерного моделирования.

Кроме этого, выявлены причины, которые не позволяют максимально повысить энергосбережение и снизить материалоемкость:

- оптимальное проектирование электродвигателей по критерию мини-

мизации себестоимости активных материалов машины или приведенных затрат по ее производству при установлении ограничений по требованиям МЭК, ГОСТ [53-56] не учитывает возможности изменения электромеханических характеристик за счет алгоритмов управления;

- оптимизация режимов питания двигателей со стороны системы управления по критерию минимизации суммарных потерь или потребляемого тока не учитывает возможность модификации активной части электрической машины, доступной при его проектировании, которая может быть направлена на повышение эффективности и оптимизацию алгоритмов управления;

- в целом, не учитывается возможность параметрической оптимизации системы, включающей в себя оптимизацию активной части электродвигателя, параметров управления с учетом типа и характера нагрузки.

Отсутствуют критерии оценки проектных вариантов мехатронных систем и их компонентов с учетом ее назначения.

Таким образом, дальнейшее совершенствование характеристик мехатронных систем возможно только за счет улучшения качественных характеристик силовых элементов системы, электродвигателя, силового преобразователя, механической передачи и учета их взаимного влияния при проектировании на основе энергетического расчета системы.

1.2 Параметры силовых компонентов мехатронных систем

Электродвигатель, силовой преобразователь и механическая передача – силовые компоненты мехатронной системы. В представленной работе наибольшее внимание уделено связке электродвигатель – силовой преобразователь, так как именно они осуществляют и обеспечивают управляемое электромеханическое преобразование энергии, и повышение эффективности для указанной связки мехатронной системы наиболее актуально. Это объясняется тем фактом, что важные показатели энергетической эффективности: КПД, коэффициент мощности – зависят от параметров питания и нагрузки. Обес-

печение высоких энергетических показателей электродвигателей как в номинальном, так и в ненормальных режимах работы – актуальная задача.

Совершенствование характеристик механических передач – важное направление теоретической и прикладной механики. В работе эти вопросы рассматриваются ограниченно, параметры и характеристики механических передач представляются классическим набором параметров, характерных для одно-, двух- и трехмассовых моделей. Наиболее важными вопросами в рамках представленной работы являются вопросы выбора оптимального передаточного числа редуктора [178], а также моделирование статических и динамических характеристик механических передач [202]. Поэтому указанные этапы должны присутствовать в ходе энергетического расчета.

Рассмотрим указанные силовые компоненты мехатронной системы. Электрические машины переменного тока малой и средней мощности, асинхронные или вентильно-индукторные, о которых идет речь в работе, в основном имеют цилиндрическую конструкцию. Конструкция общепромышленного асинхронного электродвигателя приведена на рис. 1.3. Конструкции машин, применяемых в мехатронных и робототехнических системах, могут существенно отличаться от конструкции общепромышленного двигателя. Электродвигатели могут встраиваться в изделие, ротор может быть совмещен с редуктором, кроме того, машина может иметь сложную оболочку и опоры.

Электрическую машину принято условно разделять на две основные части:

- активная часть, которая состоит из сердечника статора обмотанного и сердечника ротора обмотанного;
- конструктивная часть, которая состоит из оболочки, вала, подшипниковых опор, вентиляционного узла или узла охлаждения, вводного (терминального) устройства. У электродвигателей мехатронных систем конструктивная часть может отсутствовать (встраиваемые машины) или быть достаточно сложной – выполнять дополнительные функции. Конструктивная часть машины должна обеспечивать крепление информационно-измерительных устройств – датчиков частоты вращения, а также других вспомогательных устройств.

ные обозначения введены ОСТ16-0.801.302-85 «Машины электрические вращающиеся от 40 до 355 габарита включительно. Двигатели асинхронные. Методика электромагнитных расчетов» [158] и описаны в ряде основополагающих научных работ [58, 64, 65, 186].

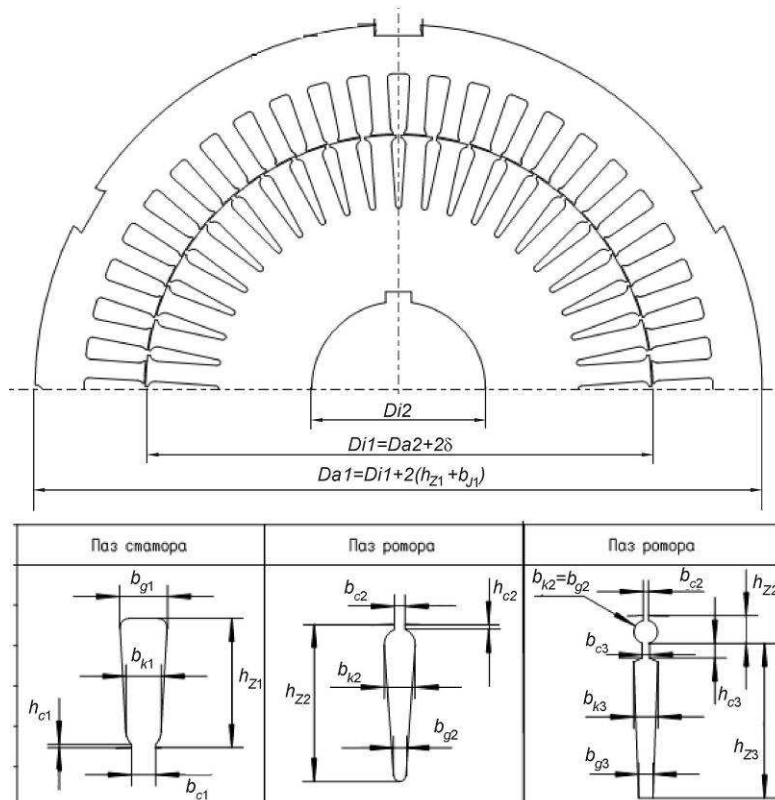


Рис. 1.4. Радиальная геометрия активной части низковольтного асинхронного двигателя

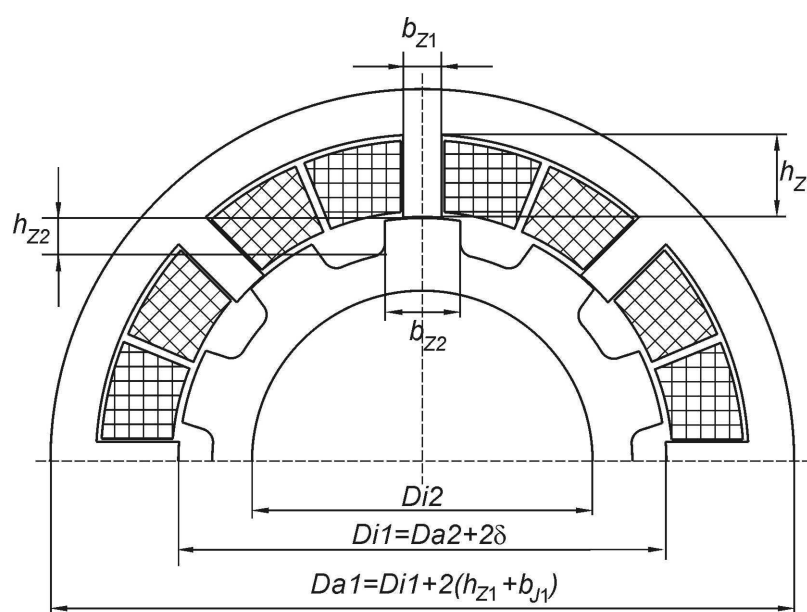


Рис. 1.5. Радиальная геометрия активной части вентильно-индукторного двигателя

Радиальная геометрия $\frac{1}{2}$ активной части машины вентильно-индукторного двигателя (ВИД) представлена на рис. 1.5. Следует отметить, что принятое представление сердечников электрических машин игнорирует вспомогательные сборочные и технологические элементы геометрии, влияние которых на электромагнитные характеристики несущественно.

Основные параметры активной части электрических машин переменного тока, показанные на рисунках радиальной геометрии, обмоточные данные и физико-технические характеристики используемых материалов описывают свойства геометрической модели активной части электродвигателя и могут быть, в основном, представлены в виде набора данных, которые сведены в таблицу 1.1. Эти параметры совместно с характеристиками питания и нагрузки являются входными данными для поверочного электромагнитного расчета машин.

Разработка активной части электродвигателя заключается в подборе значений главных размеров, параметров пазово-зубцовой геометрии и обмоточных данных машины, обеспечивающих такие электромеханические характеристики, которые соответствуют заданным в технических требованиях, при оговоренных значениях нагрузки и питания. Выбор окончательного варианта геометрии активной части осуществляется на основании проектного критерия.

Современное состояние вопроса проектирования машин переменного тока, в том числе оптимального, хорошо исследовано, обобщено и изложено в соответствующих работах [45, 58, 108, 173, 181, 186, 196]. Однако основная часть работ по расчету и проектированию активных частей электродвигателей ориентирована на их использование в сети переменного тока и, как показала практика, не может быть применена при разработке мехатронных систем непосредственно. Поэтому разработка научных основ проектирования регулируемых электрических машин переменного тока для мехатронных систем, включающих в себя концепцию, новые методики, инструменты и положения, которые позволяют адаптировать существующий аппарат расчета и проектирования для решения новых задач, актуальна.

Таблица 1.1. Основные параметры активной части электродвигателя переменного тока

№ п/п	Обозначение			Наименование, единица измерения
Главные размеры машины				
1	$Da1$			Внешний диаметр статора, мм
2	$Di1$			Внутренний диаметр статора, мм
3	$Di2$			Внутренний диаметр ротора, мм
4	L_1			Длина сердечников ротора и статора, мм
5	p			Число пар полюсов
6	δ			Односторонняя величина воздушного зазора, мм
Параметры пазово-зубцовой геометрии				
7	z_1	z_2		Число зубцов (пазов) статора / ротора
8	h_{z1}	h_{z2}	h_{z3}	Высота паза статора / верхней клетки ротора / нижней клетки ротора, мм
9	b_{z1}	b_{z2}	b_{z3}	Ширина зубца статора / в верхней клетки ротора / в нижней клетке ротора, мм
10	h_{c1}	h_{c2}	h_{c3}	Высота шлица паза статора / верхней клетки ротора / нижней клетки ротора, мм
11	b_{c1}	b_{c2}	b_{c3}	Ширина шлица паза статора / верхней клетки ротора / нижней клетки ротора, мм
12	b_{g1}	b_{g2}	b_{g3}	Ширина дна паза статора / верхней клетки ротора / нижней клетки ротора, мм
13	b_{k1}	b_{k2}	b_{k3}	Ширина клиновой части паза статора / верхней клетки ротора / нижней клетки ротора, мм
Обмоточные данные				
14	Sn			Число эффективных проводников в пазу
15	a			Число параллельных ветвей
16	n_{Σ}			Число элементарных проводников в одном эффективном
17	d_{Γ}	$d_{из}$		Диаметр голого / изолированного провода, мм
18	y_1	$y_{Г1}$		Электрический / геометрический шаг обмотки статора
19		Q_K	h_K	Сечение / высота короткозамкнутого кольца ротора, мм ² / мм

Силовая часть мехатронной системы, как правило, выполняется на основе схемы двухзвенного преобразователя частоты (ПЧ), включающей в себя

выпрямитель и инвертор, соединенные между собой через звено постоянного тока [1, 15, 62, 233].

Рассмотрим инверторную часть силового электрического преобразователя мехатронной системы с электродвигателями переменного тока [15, 51, 157, 197, 203, 225]. Для питания асинхронных электродвигателей используется инвертор напряжения, который преобразует постоянное напряжение источника в переменный ток, и имеет вид, показанный на рис.1.6. Это трехфазный инвертор напряжения, реализующий алгоритмы широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

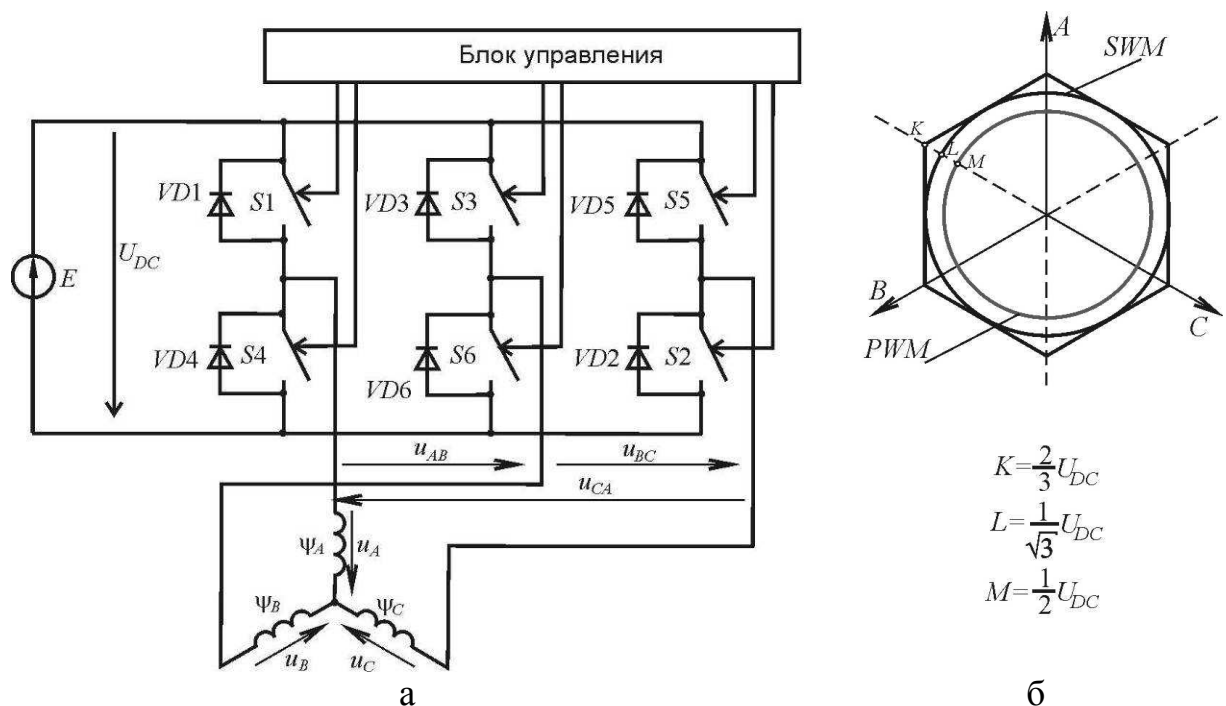


Рис. 1.6. Схема инвертора силовой части мехатронной системы с асинхронным двигателем:

а – схема; б – уровни напряжения, доступные при различных типах коммутации

Важными параметрами, необходимыми при разработке и исследовании мехатронных систем, являются:

1. Напряжение звена постоянного тока U_{DC} . Указанное напряжение может обеспечиваться либо источником электрической энергии постоянного тока, либо совместной работой источника электроэнергии переменного тока и выпрямительной части силового преобразователя электрической энергии.

2. Действующие значения фазных и линейных напряжений в двигателе $u_A, u_B, u_C, u_{AB}, u_{BC}, u_{CA}$, которые зависят от напряжения в звене постоянного тока и типа коммутации [3, 15, 36, 157, 226, 227, 250, 274]. В соответствии с рис.1.6 амплитуда линейного напряжения для классической широтно-импульсной коммутации (PWM) соответствует уровню M : $U_M = \frac{1}{2} U_{DC}$, для пространственно-векторного типа широтно-импульсной коммутации (SWM) характерен уровень L : $U_L = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{DC}$, предельное значение амплитуды линейного напряжения инвертора при негармоническом выходном напряжении соответствует уровню K : $U_K = \frac{2}{3} U_{DC}$.

Схема инвертора силового преобразователя электрической энергии для мехатронной системы с вентильно-индукторным двигателем показана на рис. 1.7.

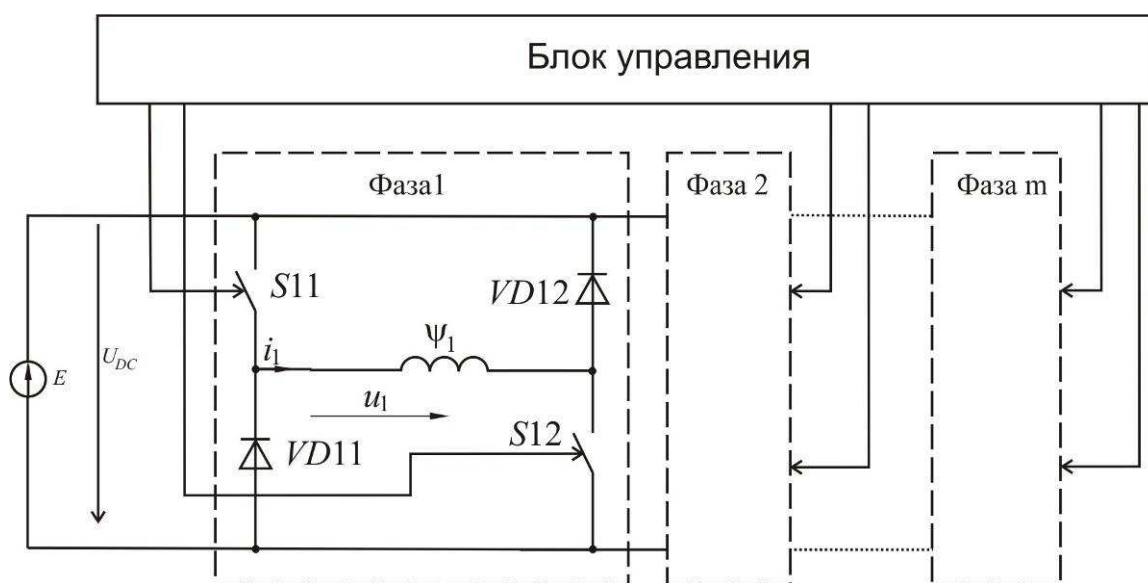


Рис. 1.7. Схема инвертора силовой части мехатронной системы с вентильно-индукторным двигателем

Следует отметить, что к k -фазе индукторной машины прикладывается максимальное напряжение, которое для показанной схемы близко к величине напряжения в звене постоянного тока, то есть: $|U_k| = U_{\text{МАКС}} \cong U_{DC}$.

Форма и параметры питающего напряжения и тока, протекающего в обмотках электродвигателя при его подключении к соответствующим схе-

мам, показанным на рис. 1.6, 1.7, определяются не только нагрузкой, но и алгоритмами управления контура тока. Управление движением рабочего органа в мехатронной системе осуществляет верхний уровень системы. Он включает в себя регулирование моментом, частотой вращения, положением рабочего органа и использует соответствующие отрицательные обратные связи. Влияние параметров настройки регуляторов тока, момента, частоты вращения проявляется в динамических режимах. Однако сами коэффициенты передачи регуляторов не относятся к силовым компонентам системы и поэтому в данном параграфе не рассматриваются.

1.3 Повышение энергетической эффективности мехатронных систем

В настоящее время существует три основных технологии энергосбережения:

1. Внедрение энергоэффективных электродвигателей (с классами энергоэффективности $IE2$, $IE3$). Энергоэффективные двигатели – машины, имеющие низкие удельные потери в основных элементах, полученные за счет снижения электромагнитной нагрузки на соответствующий элемент, применения новых материалов и технологий [17, 96, 107, 121, 133].

2. Внедрение регулируемого электропривода в целях энергосбережения. Основной путь повышения энергетической эффективности средствами электропривода – подача конечному потребителю – технологической машине – необходимой в каждый момент мощности. Это может быть достигнуто посредством управления координатами электропривода, т.е. за счет перехода от нерегулируемого электропривода к регулируемому [24, 96, 173].

3. Внедрение энергоэффективных мехатронных систем, минимизирующих потери в компонентах за счет максимального согласования их характеристик и высокого уровня организации управления энергетическими процессами.

Выбор одной из представленных технологий должен быть обусловлен результатом решения задачи минимизации энергопотребления при имеющихся ограничениях на размер инвестиций в систему и заданных технологи-

ческих условиях ее эксплуатации. Во многих приводных устройствах снижение энергопотребления может быть получено за счет повышения класса энергоэффективности применяемого двигателя, т.е. его замены. Это не приведет к значительному усложнению системы и существенным инвестициям в нее, заключающимся в покупке преобразователя, частоты, контроллера, датчиков и т. д. Более того, данное решение в ряде случаев позволит максимально снизить затраты на электроэнергию, потребляемую системой, а следовательно, стоимость жизненного цикла изделия или аналогичный параметр, называемый ценой владения. Во многих случаях применение электродвигателей с высоким классом энергоэффективности не дает существенного снижения энергопотребления, а значит, необходимо искать другие решения повышения энергоэффективности системы, в том числе переходить на использование частотного регулирования в целях энергосбережения. Такое решение, во-первых, усложнит систему за счет введения в нее дополнительных элементов, а во-вторых, приведет к необходимости управлять ее технологическими параметрами, в самом простом случае стабилизировать какой-либо физический параметр. Применение мехатронных систем в целях энергосбережения характеризуется большей сложностью, в сравнении с внедрением регулируемого электропривода для решения аналогичной задачи. Это объясняется как необходимостью использования в ней более сложных элементов – электродвигателя, силового преобразователя, механической передачи и др., так и большей специфичностью алгоритмов управления параметрами и характеристиками элементов системы. Однако в ряде случаев никакими другими способами получить экономию энергии, кроме использования энергоэффективных мехатронных систем, не удастся.

Причины, по которым происходит экономия энергии при переходе от электродвигателей с низким классом энергоэффективности к двигателям с высоким классом энергоэффективности, в целом понятны – снижение потерь в элементах электрической машины. Но по каким причинам возникает экономия энергии при переходе от нерегулируемого электропривода к регули-

руемому или при переходе к мехатронным системам – требует анализа. Дело в том, что введение дополнительных элементов в устройство: силового электрического преобразователя (инвертора), управляющего контроллера – вызывает дополнительные потери энергии в системе – потери в силовом преобразователе, затраты мощности на функционирование управляющих элементов. Существенными в данном случае являются потери в силовом преобразователе, которые, как правило, составляют до 10% от величины потерь в электрической машине [3-5, 100-102, 187]. Попытки объяснить причины повышения эффективности преобразования энергии в регулируемом электроприводе были сделаны в работах ряда авторов [24, 96, 173], но они недостаточно убедительны по причине анализа процесса только со стороны привода. Однако в указанных работах была правильно отмечена необходимость разделять экономию энергии, происходящую в циклических режимах эксплуатации, обусловленную существенным снижением потерь при частотном пуске, от экономии энергии, происходящей в продолжительных режимах, обусловленной другими причинами.

Для объяснения возникновения экономии электрической энергии за счет регулирования следует рассмотреть электродвигатель как источник двух видов потерь энергии: переменных потерь, зависящих от величины нагрузки, – электрические потери в обмотках статора и ротора, и постоянных потерь, не зависящих от нагрузки, но зависящих от частоты питания, а следовательно, вращения. К постоянным потерям энергии принято относить магнитные потери в сердечниках и механические потери. Отношение мощности постоянных потерь к переменным принято обозначать коэффициентом потерь K_0 , величина которого для электродвигателей средней и малой мощности лежит в пределах от 0,2 до 0,4. Так вот, при снижении нагрузки на электродвигатель, обусловленной технологической нагрузкой на сопряженную с ней машину или механизм, происходит уменьшение мощности переменных потерь, а постоянные потери остаются неизменными. Регулирование магнитным потоком машины и частотой вращения ее ротора позволяет уменьшать мощ-

ность постоянных потерь пропорционально квадрату от величины потока и частоты питания. Другая составляющая экономии энергии в системе объясняется снижением мощности потерь в технологической машине или механизме при уменьшении частоты вращения рабочего вала. Однако эта составляющая может отсутствовать или быть незначительной. Именно за счет снижения от частоты вращения постоянных потерь двигателя и потерь в технологической машине возникает экономия энергии, получаемая при использовании регулирования частоты вращения ротора.

Важным вопросом энергосбережения в циклических режимах является вопрос снижения потерь энергии на пусках и при торможении. Этой проблеме посвящен ряд работ [24, 173, 228], однако в них обойдены вниманием такие принципиальные вопросы, как исследование влияния времени пуска на величину потерь, а также вопросы влияния параметров регулятора частоты вращения на потери в электродвигателе. При этом вопросы, посвященные задаче определения целесообразности перехода от нерегулируемого электропривода к регулируемому в целях увеличения энергетической эффективности системы, в целом, проработаны. В настоящее время, внедрение энергосберегающего регулируемого привода выделилось как направление энергетической отрасли промышленности и достигло значительных успехов [24, 128, 129, 132, 169]. Разрабатываются методики, стандарты, рекомендации и другая научно-методическая литература.

Вопрос перехода от энергосберегающего регулируемого электропривода к энергосберегающим мехатронным системам в настоящее время в научной литературе представлен незначительно. Несмотря на ряд серьезных работ в области повышения энергоэффективности технических систем за счет применения мехатронных подходов, технологий, не ясно:

1. В каких случаях целесообразен переход от энергосберегающего электропривода к мехатронным системам?
2. В чем заключаются основные отличия мехатронных систем от энергосберегающего электропривода?

3. Каковы пределы снижения потерь энергии при переходе от энергосберегающего регулируемого электропривода к мехатронным системам и какими факторами объясняется снижение потерь в системе при таком переходе?

1.4 Материалосбережение в мехатронных системах

Достижение минимальных массогабаритных показателей мехатронной системы и ее компонентов – вопрос эволюции электромеханики. Он обусловлен как стремлением к минимизации объемов технических систем, так и истощением природных ресурсов. Следует отметить, что в настоящее время в электромеханике существует несколько путей снижения массы и габаритов:

1. Повышение использования активных материалов электрических машин в переходных и установившихся режимах работы. Этот путь основан на повышении пусковых характеристик электрических машин за счет использования специальных конструкций сердечников и обмоток электродвигателей, а также на повышении удельных нагрузок в установившихся режимах работы за счет повышения эффективности их охлаждения.

2. Внедрение регулируемого электропривода, позволяющего использовать электрический двигатель в режиме с минимальной тепловой нагрузкой на его элементы, при его работе в ненормальном режиме. Указанный путь предполагает заменить неэффективные с точки зрения тепловой нагрузки машины режимы тяжелого пуска, повышенной или пониженной частоты вращения, необходимые для сопряженной технологической машины или механизма, на частотно-управляемые режимы с меньшими потерями энергии в элементах двигателя. Снижение тепловой нагрузки позволяет снизить габариты и массу машины.

3. Переход к использованию мехатронных систем, что, в свою очередь, предполагает применение оригинальных, специально разработанных компонентов всей электромеханической системы, обеспечивающих работу в необходимых условиях под управлением специальных алгоритмов, которые по-

зволяют обеспечить минимально возможные габариты всего изделия. В данном случае оправдано использование моноблочного мехатронного модуля.

Представленные пути достижения материалосбережения в задачах электромеханического преобразования энергии схожи с направлениями повышения энергетической эффективности системы с той разницей, что при повышении энергоэффективности производится снижение потерь энергии для увеличения КПД, а в случае снижения материалоемкости, за счет снижения мощности потерь, уменьшают габариты устройства.

Как и в предыдущей задаче, усложнение системы за счет добавления в ее структуру силового преобразователя, инвертора, управляющего контроллера не может уменьшить ее массогабаритные показатели непосредственно. Снижение габаритов и массы происходит только при уменьшении активных и конструктивных элементов машины, основанном на замене энергоемких специальных режимов (тяжелого пуска, вращения на другой частоте, генераторного режима) на управляемые, менее энергоемкие режимы работы.

В настоящее время существует значительное количество конструктивных и электрических исполнений общепромышленных и специальных электродвигателей переменного тока (асинхронных), которые реализуют длительные, кратковременные и периодические режимы работы за счет модификации активной части машины от основного исполнения, и за счет этого обеспечивают снижение массы и габаритов привода. Это:

1. Электродвигатели с повышенным пусковым моментом. Модификация обеспечивает работу с высокой статической и динамической нагрузками при пуске и стабильную работу в номинальном режиме за счет применения двухклеточного ротора;

2. Электродвигатели с повышенным скольжением. Указанная модификация обеспечивает снижение скорости нарастания температуры обмотки статора, что обеспечивает длительный запуск механизмов с большой инерцией. Данная модификация рассчитана на применение в кратковременных

режимах работы и изготавливается с увеличенным сопротивлением клетки ротора.

3. Многоскоростные двигатели на две, три и четыре частоты вращения. Такие машины изготавливаются со специальными полюсно-переключаемыми или независимыми обмотками, а их использование обеспечивает ступенчатое регулирование частоты вращения.

4. Двигатели с фазным ротором, в которых дополнительное сопротивление включается в цепь обмотки ротора для обеспечения безопасного длительного пуска или подхвата нагрузки машиной.

Очевидно, что расширение области применения электродвигателя за счет его модификации от основного исполнения не проходит без ухудшения энергетических характеристик – увеличенных электрических потерь в обмотке ротора или статора. Именно увеличение этих потерь объясняет эффективность перехода от нерегулируемых электродвигателей к регулируемому электроприводу. В данной работе многоскоростные двигатели, предназначенные для ступенчатого регулирования, считаются нерегулируемыми, так как для них управление частотой вращения происходит без изменения формы и параметров питающего напряжения.

В связи с вышесказанным возникают следующие вопросы:

1. Какими факторами может быть обусловлена экономия объемов активных частей в мехатронных системах? Каковы ее пределы?
2. В чем заключаются основные отличия мехатронных систем от регулируемого привода?

1.5 Повышение надежности мехатронных систем и их компонентов

Надежность электромеханических систем – важный фактор их эксплуатации. Очевидно, что электромеханические системы – это устройства с последовательной структурой надежности, то есть выход любого из элементов приведет к потере работоспособности всего изделия. Кроме того, практика пока-

зывает, что электродвигатель, в частности его обмотки, самый ненадежный элемент электромеханических устройств [18, 46, 57, 87, 118, 130, 159, 208].

С одной стороны, вероятность безотказной работы электромеханической системы определяется произведением вероятностей безотказной работы всех ее элементов, и поэтому приводы, состоящие из одного электродвигателя, должны иметь максимально возможную надежность. С другой стороны, регулирование частоты вращения, для которого необходимо дополнить систему новыми функциональными элементами – выпрямителем, инвертором, управляющим контроллером – позволяет снизить ударные нагрузки на электродвигатель, механическую передачу, приводимую технологическую машину и за счет этого увеличить срок их безотказной работы и, как следствие, надежность всего изделия. Практика показывает, что электромеханические системы, построенные на основе регулируемого электропривода, при соблюдении требований к электрической стойкости изоляции [257] более надежны, чем электрические приводы, построенные на основе нерегулируемой машины. Парадоксально, но увеличение числа элементов, а также ухудшение электрических условий эксплуатации наиболее ненадежного элемента – электродвигателя, присущее для регулируемого электропривода, увеличивает надежность системы в целом. Этот парадокс объясняется улучшением условий эксплуатации электрической машины, а точнее, ее обмоток в тепловом отношении при ухудшении условий эксплуатации той же обмотки в электрическом отношении. Таким образом, тепловой режим работы обмотки статора и ротора машины переменного тока обуславливает надежность и ресурс всей электромеханической системы. В связи со сказанным возникают вопросы, требующие выяснения.

1. Как использование мехатронных технологий может повлиять на тепловой режим электродвигателя?

2. За счет повышения вероятности безотказной работы каких еще элементов, кроме обмоток статора и ротора, может быть увеличена надежность электромеханических устройств на основе мехатронных систем?

3. В чем заключаются отличия в надежности системы и ее элементов, построенных на основе регулируемого электропривода и мехатронных технологий?

1.6 Эволюционные аспекты развития мехатроники

Основной особенностью мехатронной системы является функциональная интеграция входящих в нее элементов, смысл которой заключается не только в объединении всех элементов в одном корпусе, но и в направленной объединяющей модификации каждого из элементов и алгоритмов [117, 151, 153, 174-176, 209]. Указанная направленная модификация элементов и алгоритмов осуществляется при их разработке и подчинена главной цели системы: энергосбережению, материалосбережению, повышению надежности. Улучшение качественной характеристики, отражающей цель мехатронной системы: коэффициента полезного действия или суммарной мощности потерь для энергосберегающих систем; массы и габаритов для материалосберегающих систем; показателей надежности для систем, где они являются главными характеристиками, достигается не за счет выбора элементов с высокими целевыми характеристиками в номинальной режиме, а за счет суммарного улучшения целевой характеристики всей системы в интересующем режиме работы. Это улучшение, как показывает опыт, достигается за счет ухудшения характеристик одного или нескольких элементов мехатронной системы при его работе вне этой системы. Указанная особенность приводит к невозможности построения мехатронной системы из стандартных изделий, производимых серийно.

Необходимо отметить, что мехатронные системы, в разработке которых автор принимал непосредственное участие, были созданы в результате научно-исследовательской деятельности предприятий: ПАО «НИПТИЭМ», ООО «ВЭМЗ-Спектр», ООО «Русэлпром-Мехатроника» и ООО «ПК «ВЭМЗ», входящих в российский электротехнический концерн «Русэлпром». При этом научно-исследовательские коллективы не стремились непосредственно к

разработке мехатронных систем, а их появление явилось эволюцией разработок в области электромеханики и регулируемого электропривода. На рис. 1.8 представлена диаграмма, характеризующая историю разработок владимирских подразделений концерна в области электромеханики, результатом которых стали первые разработки мехатронных систем, внедренные в промышленности и на транспорте. Анализ диаграммы показывает, что разработка мехатронных систем концерном «Русэлпром» стала возможна только после накопления значительного опыта по разработке регулируемого электропривода, систематизация которого проявилась в создании новых специализированных методик анализа и синтеза.



Рис. 1.8. Диаграмма разработок в области регулируемого электропривода

Выводы, постановка задачи и определение методов исследования

Высокий технический уровень современных электромеханических устройств обеспечен научными исследованиями, начавшимися более 100 лет назад и продолжающимися в настоящее время. Эти технические достижения были predeterminedены в работах тысяч отечественных и зарубежных ученых. На сегодняшний день практически отсутствуют неисследованные разделы в области проектирования электродвигателей, электроприводов, в электротехнике, теории управления. Однако в процессе своего развития человечество

подошло к проблемам истощения материальных и энергетических ресурсов, необходимости существенно уменьшать энергоемкость, материалоемкость, массогабаритные показатели всех видов изделий. В связи с чем логичным стало появление нового научного направления, объединяющего электротехнику, электромеханику, механику, силовую и управляющую электронику, теорию управления, – мехатронику, обещающую решить проблему повышения эффективности, снижения энерго- и материалоемкости электромеханических систем за счет синергетического эффекта. В результате оказалось, что мехатронные системы не обеспечены должным уровнем теоретических основ для их разработки. Хорошо проработанные методики и принципы базовых научных направлений: механики, электромеханики, теории электропривода и теории управления – не могут быть использованы непосредственно для задач анализа и синтеза мехатронных систем. В связи с чем стало актуально разработать научные основы анализа и синтеза энергетических компонентов мехатронных систем, основанные на применении энергетического расчета как базового элемента проектирования. Для этого необходимо:

- Разработать основные положения методики энергетического расчета для анализа и синтеза мехатронных систем.

- Подтвердить эффективность использования методики энергетического расчета для анализа и синтеза мехатронных систем различного назначения.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ И МЕТОДИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Выбор концепции проектирования мехатронной системы – ответственное действие, которое определяет качество, сроки и затраты на разработку и влияет на ее конкурентоспособность на рынке. Так как структура мехатронной системы известна, то задача проектирования сводится к параметрическому синтезу ее компонентов. Таким образом, концепция проектирования определяет общие характеристики системы и влияет на параметры ее компонентов. Просчеты при разработке, в том числе за счет неверно выбранного подхода проектирования, могут приводить к снижению надежности, увеличенному содержанию дорогостоящих и редких материалов, невозможности практической реализации компонентов системы.

Электромеханический преобразователь энергии, в данной работе – электродвигатель переменного тока – является центральным компонентом мехатронной системы, а следовательно, его параметры в первую очередь определяют характеристики всей системы. Поэтому проектирование системы должно начинаться с моделирования, расчета и анализа электромеханических процессов в электродвигателе, но при этом учитывать влияние на него силового преобразователя и нагрузки. Проверка реализуемости системы должна начинаться с анализа характеристик двигателя.

Параметрический синтез и проектирование силовых компонентов мехатронной системы может осуществляться на основании двух концепций: иерархического подхода или энергетического расчета. Ранее отмечалось, что наибольшую целесообразность имеет использование энергетического расчета, однако его применение не предполагает разработку электрической машины. Традиционный энергетический расчет [152, 220] основан на выборе электродвигателя из каталога, что не позволяет максимально эффективно использовать активную часть машины, так как она разработана в соответствии с принятым регламентом увязок мощности и габарита, системой напряжений, частот

вращения и полюсностей. Возможность заказа разработки специального электродвигателя соответствующим проектным организациям также затруднена, так как специалисты электромеханики прекрасно владеют методами проектирования электрических машин, однако слабо представляют особенности мехатронных систем. Вследствие этого электродвигатели, ориентированные для работы в мехатронных системах, разработанные без учета ее специфики, обладают низкими качественными показателями (массогабаритными, энергетическими, эксплуатационными) в сравнении с возможными, так как декомпозиция мехатронной системы на элементы при проектировании приводит к ухудшению ее технических характеристик, а эффект упрощения оказывается не более чем кажущимся.

Разработке концепции (подхода) и алгоритмов проектирования электромеханического преобразователя энергии (электродвигателей переменного тока) для мехатронных систем в рамках энергетического расчета посвящена данная глава.

2.1 Основные задачи и этапы энергетического расчета

Энергетическим расчетом мехатронной системы принято называть расчет, в котором на основе изучения энергетических процессов в системе выявляются необходимые энергетические характеристики и определяются способы обеспечения заданных динамических свойств, необходимых для предполагаемого управления. При этом возможна минимизация некоторых качественных характеристик – расхода энергии, мощности потерь, массы и габаритов, установленной мощности. Энергетический анализ мехатронной системы подразумевает расчет способности имеющейся (проектной) силовой части осуществлять заданный закон управления. Энергетический синтез предполагает расчет и выбор элементов силовой части мехатронной системы (электродвигателя, механической передачи, силового преобразователя) при заданном законе управления [152, 182, 219, 220]. Следует отметить, что разработка элементов силовой части, вместо их выбора, в задаче энергетического

синтеза позволяет существенно улучшить критические характеристики проектируемой системы. Однако такой подход ранее не применялся.

Энергетический расчет должен включать следующие этапы [152, 220]:

1. Анализ нагрузочных диаграмм и характеристик исполнительного механизма.
2. Расчет необходимой частоты вращения и углового ускорения ротора электродвигателя.
3. Расчет необходимого момента во всех возможных статических и динамических режимах.
4. Построение требуемой нагрузочной и перегрузочной характеристик.
5. Выбор существующего или разработка нового электродвигателя, параметры которого удовлетворяют п.1-3.
6. Выбор существующей или разработка новой механической передачи.
7. Расчет и выбор электрического силового преобразователя (инвертора и выпрямителя).

Выполнение п. 5, 6, 7 предполагает итерационный процесс, необходимый для того, чтобы получаемые проектные варианты позволяли минимизировать материалоемкость как электродвигателя, так и передачи, а также установленную мощность полупроводниковых приборов электрического силового преобразователя.

8. Учет упругости кинематических связей.
9. Оптимизация структуры системы по целевой функции: потерям энергии, материалоемкости, надежности.
10. Оптимизация режимов электропитания двигателя и связанная с ней оптимизация параметров инвертора.
11. Окончательный расчет статических и динамических параметров системы.
12. Воспроизведение и моделирование законов управления и нагрузки мехатронной системы.

На рис. 2.1 приведена схема, на которой показана последовательность и этапы энергетического расчета мехатронной системы. Предложенный алго-

ритм основан на использовании аналога электродвигателя (базовой машины) на начальных этапах энергетического расчета мехатронной системы. Опыт подтверждает, что использование аналога на первых этапах существенно сокращает процедуру энергетического синтеза за счет точного, но простого определения первых проектных характеристик системы.



Рис. 2.1. Алгоритм проектирования мехатронной системы на основе энергетического расчета

Следует отметить, что методики, применяемые для решения задачи энергетического расчета, могут быть различны, а их содержание зависит в том числе от типа приводного механизма.

2.2 Разработка алгоритма проектирования электродвигателей переменного тока для мехатронных систем

Основой для разработки научно обоснованного подхода к проектированию любой научно-технической и высокотехнологичной продукции может являться анализ жизненного цикла изделия [160]. Большинство изделий, в

которых используются мехатронные системы, имеют типовой жизненный цикл. Его основные стадии стандартизованы и регламентируются документом Р 50-605-80-93 «Система разработки и постановки продукции на производство. Термины и определения».

Мехатронные системы представляют собой программно-аппаратно-машинный комплекс, и в нем имеются элементы, модификация которых в процессе производства и эксплуатации не представляет сложности. К такой модификации можно отнести замену алгоритма или настроек системы управления. Эта модификация может происходить многократно при эксплуатации и ремонте, а также на стадии выпуска и не вызывает проблем и нареканий в случае, если при проведении модификации качественные характеристики изделия улучшаются. Модификация аппаратной части – электроники системы управления, датчиков, силового преобразователя, как правило, связана с изменением элементной базы – эволюцией электроники – и может быть доступна только на этапе выпуска и ремонта продукции. Машинную часть в процессе жизненного цикла изменять затруднительно.

Следует отметить, что технические затруднения могут возникать в случае, когда модификация одной из частей системы требует обязательного изменения остальных компонентов. С точки зрения увеличения продолжительности жизненного цикла изделия, возникновения такой ситуации не допустимо.

Наибольшие затруднения при модифицировании в процессе эволюции изделия связаны с усовершенствованием двух элементов мехатронной системы – электродвигателя и механической передачи, то есть машинной части изделия. Поэтому разработка данных элементов мехатронной системы должна проводиться особенно тщательно с учетом дальнейшего совершенствования алгоритмов управления и аппаратной части в процессе развития изделия.

Снизить себестоимость изделия в процессе жизненного цикла за счет уменьшения стоимости электрической машины и редуктора, как правило, не удастся. Это связано с производственно-технологическими особенностями производства электрических машин и механических передач. Поэтому необ-

ходимо обеспечивать минимальную себестоимость машинной части, а следовательно, электрической машины и механической передачи на этапе проектирования.

Таким образом, электромеханический преобразователь энергии мехатронной системы следует разрабатывать один раз на весь жизненный цикл изделия, а возможность модификации алгоритмов управления в процессе жизненного цикла должна быть заложена на этапе проектирования.

В связи с чем можно сформулировать основные требования к задаче проектирования электродвигателей для мехатронных систем:

- материалоемкость и себестоимость машинной части мехатронной системы должны быть минимальными, но при этом необходимо обеспечить требования по надежности, диапазону регулирования, заданной нагрузке и перегрузочной способности во всех режимах ее работы;

- исследование электромеханических характеристик мехатронной системы в статических и динамических режимах должно осуществляться с учетом алгоритмов управления на всех этапах проектирования. Необходимо учитывать нелинейные характеристики элементов, ограничения ресурсов, потери энергии в силовых элементах.

Общую процедуру проектирования мехатронной системы можно представить так, как это показано на рис. 2.2.

При разработке мехатронных систем, в соответствии с представленной блок-схемой, в качестве начального решения целесообразно использовать освоенные производством элементы мехатронной системы, то есть: серийно изготавливаемые электродвигатели; серийно изготавливаемые механические передачи; серийно изготавливаемые силовые преобразовательные устройства; имеющиеся алгоритмы управления; промышленные источники электропитания. После оценки качественных характеристик полученной системы проводится модифицирование одного элемента, учитываются изменения, оказанные этой модификацией на параметры других элементов, проводится сравнение характеристик новой и исходной систем. Целесообразно начинать

изменение изделия с модификации электродвигателя и механической передачи – искать оптимальное соотношение передаточного числа редуктора и момента электрической машины.

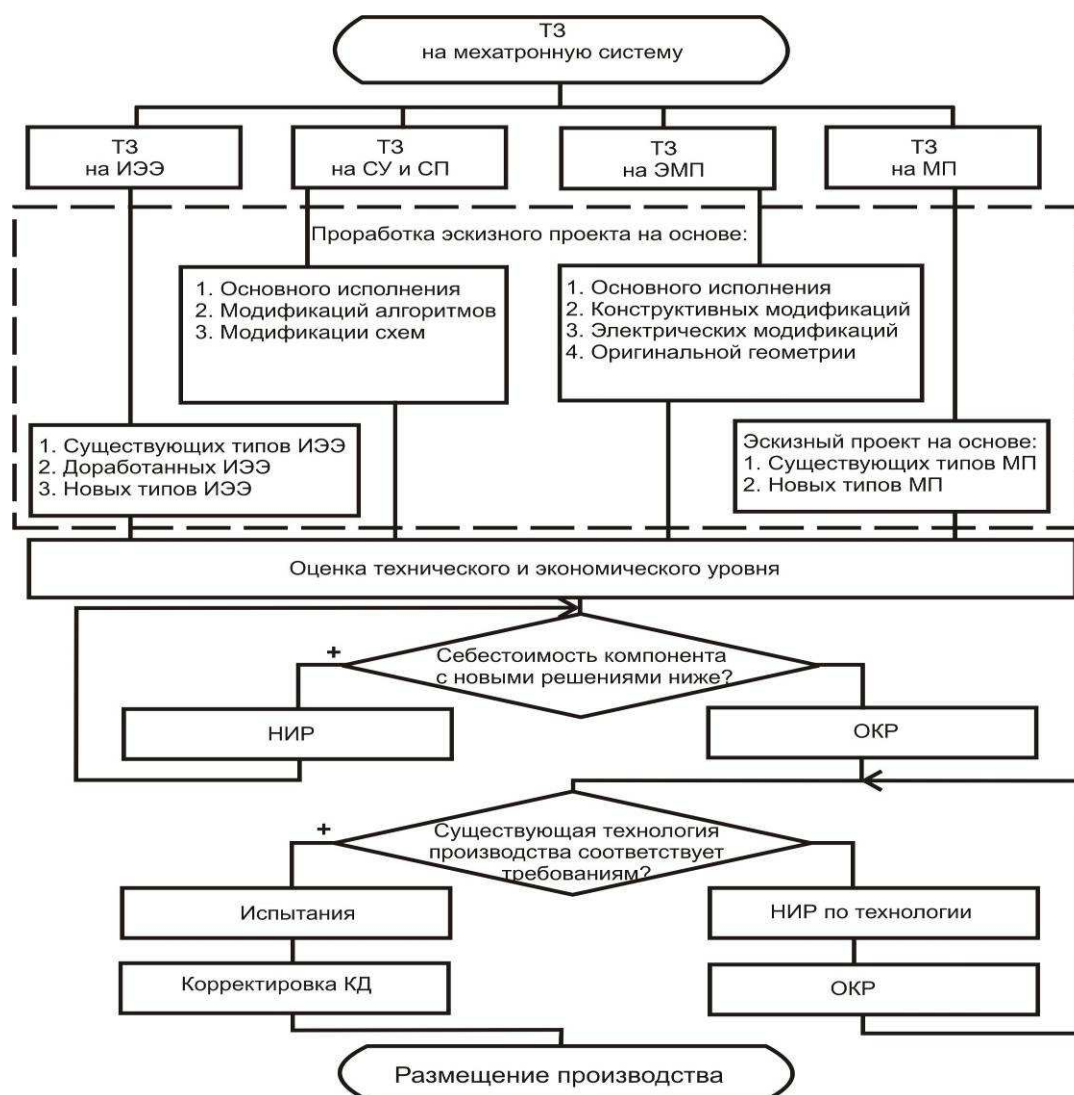


Рис. 2.2. Блок-схема проектирования мехатронной системы

Опытная работа по указанной схеме, используемая при разработках, проводимых ПАО «НИПТИЭМ» совместно с ООО «ВЭМЗ-Спектр», в период с 2005 по 2012 г., анализ процессов и полученных результатов позволили сформулировать положения, детализирующие блоки, касающиеся разработки электродвигателей, которые можно представить в виде следующих основных положений, а также блок-схемы, представленной на рис. 2.3:

1. При проектировании электромеханического преобразователя учитывается его взаимодействие с другими компонентами мехатронной системы.

1.1. Проводится учет ограничений, накладываемых со стороны источника питания, преобразователя энергии, механической передачи. Учитываются алгоритмы управления системы. Увеличение потерь в электродвигателе за счет влияния инвертора учитывается с помощью суммарного коэффициента гармонических искажений, значения которого выбираются на основе ГОСТ Р МЭК/ТС 60034-17-2009 и экспериментальных данных. Кроме этого, проводится учет влияния снижения напряжения питания, вызванного конечным значением емкости в звене постоянного тока. В случае сложной механической части мехатронной системы для ее моделирования используются многомассовые механические модели.

1.2. Исследуется возможность изменения основных параметров компонентов мехатронной системы, исходя из условия улучшения механических, регулировочных и энергетических характеристик системы, а также упрощения алгоритмов управления и уменьшения стоимости. Значения основных электромеханических показателей в диапазоне изменения частоты вращения ротора электродвигателя представляются с помощью скоростных характеристик.

2. Для минимизации затрат, связанных с оснасткой производства, проектирование электрических машин для мехатронных систем целесообразно проводить на основании деталей и компонентов электродвигателей выпускаемых серий. Направление проектирования предполагает постепенную модификацию общепромышленных электродвигателей: серийный электродвигатель – пристраиваемые узлы – модифицированные элементы оболочки – изменение обмотки статора – изменение пазовой геометрии ротора – изменение длины пакетов ротора и статора – изменение пазовой геометрии статора – изменение внешнего диаметра активной части машины и оболочки.

3. Оценка каждого из возможных вариантов производится на основании критериев, отражающих: актуальную себестоимость каждого из компонентов и системы в целом; основные характеристики каждого из элементов; главные характеристики мехатронной системы – механические, регулировочные, энергетические и эксплуатационные; относительный вклад каждой

из главных характеристик в себестоимость, материалоемкость, энергоемкость мехатронной системы.

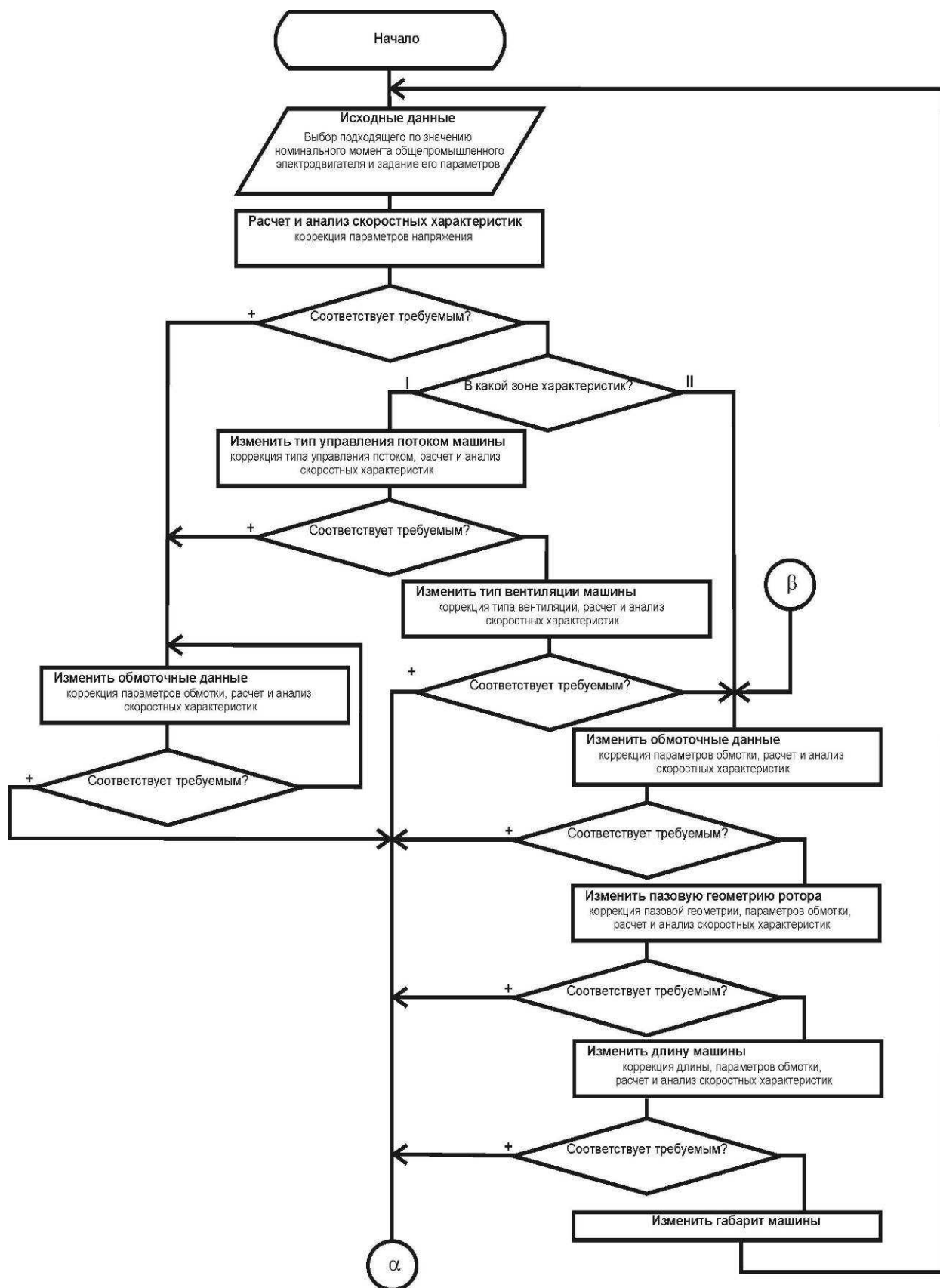


Рис. 2.3. Блок-схема проектирования электродвигателя для мехатронной системы

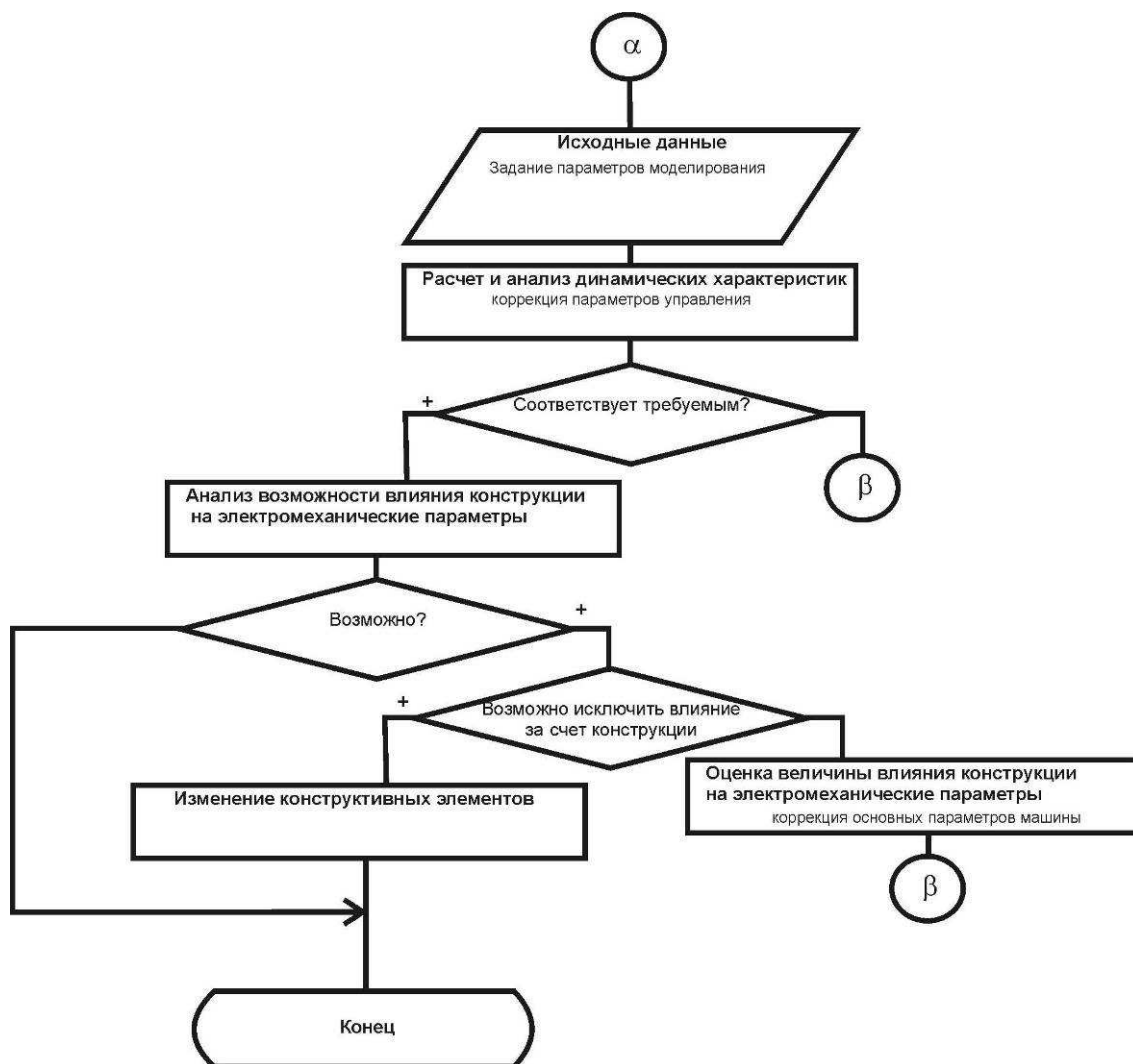


Рис. 2.3. Блок-схема проектирования электродвигателя для мехатронной системы

Реализация представленного подхода столкнулась с рядом затруднений, связанных с отсутствием необходимых методик расчета и анализа, а также эмпирических данных, требуемых для их разработки. Таким образом, для реализации предлагаемой методики проектирования необходимо:

1. Разработать новые методики расчета, моделирования и проектирования электрических машин, учитывающие влияние алгоритмов управления, ограничений и искажений, вызванных влиянием электронных инверторов.
2. Определить критерии оценки проектных вариантов мехатронной системы и ее компонентов, учитывающие назначение системы, заданный диапазон изменения нагрузки, частоты вращения, алгоритмы управления.

Сформулировать правила, определяющие содержание проектирования в зависимости от значений проектного критерия.

2.3 Основы создания серии двигателей переменного тока для промышленных мехатронных систем

Использование аналога – базовой машины, на основе модификации которой происходит разработка электродвигателя для мехатронной системы, в значительной степени облегчает задачу проектирования. Другим способом может являться подход, при котором главные размеры электрической машины определяются с помощью машинных постоянных или справочных таблиц однако он не учитывает технологических особенностей конкретных производств. Поэтому важной задачей является выбор серии двигателей, на базе основного исполнения которой будут строиться модификации для мехатронных систем. Следует отметить, что при этом тип электродвигателя играет существенную роль, однако не определяющую, поэтому необязательно иметь в качестве аналогов две серии: асинхронных и вентильно-индукторных двигателей, тем более что последнее производством не освоено.

Как правило, при выборе типа двигателя для электропривода или мехатронной системы отечественные и зарубежные потребители отдают предпочтение асинхронным частотно-регулируемым машинам. Кроме того, во многих случаях в частотно-регулируемом электроприводе используются общепромышленные двигатели с короткозамкнутым ротором, а также их модификации. Разнообразие модификаций чаще всего ограничивается следующими опциями: система независимой вентиляции; пристроенный датчик частоты вращения; пристроенный тормоз. Использование общепромышленных асинхронных электродвигателей в регулируемом электроприводе дает удовлетворительные практические результаты и в то же время характеризуется низкой стоимостью. Однако такой подход обладает рядом недостатков:

1. Эффективность охлаждения самовентилируемых машин снижается при уменьшении частоты вращения, что не позволяет длительно работать в

зоне постоянства момента механической характеристики.

2. Падение напряжения в инверторе, вызванное конечной емкостью конденсатора и ограничениями по скважности широтно-импульсного модулятора, не позволяет создать номинальный поток машины в окрестности номинальной частоты вращения и выше ее, вследствие чего растет потребляемый ток, значительно снижается КПД. Фактически приходится снижать номинальную мощность электродвигателя на 6% за счет снижения номинальной частоты питания до значения 47 Гц.

3. Высокочастотная составляющая тока от широтно-импульсной модуляции вызывает дополнительные потери, что приводит к необходимости снижать мощность еще на 5-6%. В указанном аспекте интересными для потребителя становятся электродвигатели с сервис-фактором [122], величина которого может быть использована для компенсации этих потерь.

4. Активные части общепромышленных двигателей разрабатывались для надежного прямого пуска и работы от сети переменного тока. Структура и параметры пазовой геометрии статора, ротора, обмоток ориентированы на минимизацию пускового тока, кажущейся мощности, при решении задачи увеличения пускового и максимального моментов. Для этого используется двойная клетка ротора, применяются сплавы со сниженной проводимостью, пазы специальной формы. Такие конструкторско-технологические решения приводят к нерациональному использованию объема активных частей электродвигателя, питаемого от преобразователя частоты.

Надежная эксплуатация общепромышленных двигателей в частотно-регулируемом электроприводе осуществляется только благодаря значительным запасам по мощности, что не эффективно. Поэтому разработка серии частотно-регулируемых электродвигателей, активная часть которых оптимизирована для работы в системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель, учитывает режимы работы, типы механической нагрузки, требуемый диапазон регулирования и на основе которой целесообразно синтезировать мехатронные системы, актуальна.

В данном параграфе приведены основные результаты, полученные при выполнении технического проекта, посвященного разработке активных частей серии частотно-регулируемых электродвигателей широкого применения [67, 68, 78, 80, 191], которые целесообразно использовать в качестве основного исполнения машин. Результатами разработки стали варианты активных частей (включающие в себя данные о главных размерах, параметрах пазово-зубцовой геометрии, обмоточных данных), расчетные значения электромеханических, энергетических и тепловых характеристик, на основе которых был сформирован основной раздел базы данных. Этот раздел в дальнейшем будет использован при проектировании модификаций частотно-регулируемых электродвигателей и электрических машин для мехатронных систем. Кроме того, необходимо понимать, что разработка не одного, а серии электродвигателей позволяет определить явные закономерности, сформировать и уточнить концепцию проектирования.

Рассмотрим основные актуальные технические приложения частотно-регулируемого электропривода с учетом режимов работы по ГОСТ Р 52776-2007 (IEC 60034-1), типа нагрузки, необходимого диапазона регулирования, используемых полюсностей, типовых способов охлаждения, классов нагревостойкости изоляции обмотки и других конструктивных особенностей. В таблице 2.1 отражена предлагаемая классификация, данные для которой получены исходя из известных рекомендаций [14, 145, 150, 202, 205, 206] и опыта научно-исследовательских и конструкторских подразделений ПАО «НИПТИЭМ» [33, 59, 67, 68, 123, 293].

Существенным затруднением, возникающим при разработке частотно-регулируемых двигателей, является проблема декларации номинальных данных машины. Как известно, номинальными данными электродвигателя (мощность, режим работы, напряжение и частота питания) являются те, для которых он предназначен заводом-изготовителем [56]. В этом случае возникает техническая проблема: если заводом-изготовителем предполагается работа электродвигателя во множестве режимов работы, то данные, считаю-

щиеся номинальными должны декларироваться для каждого режима. Рассмотрим сложившуюся проблему по частям.

Таблица 2.1. Особенности характеристик регулируемых электроприводов

Тип электропривода	Регулировочные особенности			Конструктивные особенности			Модификация		Исполнение
	Режим работы	Тип нагрузки	Диапазон рег.	2р	IC	Класс изол.	ДС	Т	
Краново-металлургический	S3	2(CT+CP)	10:1 вниз 2:1 вверх	4,6,8	416, 411	F,H	+, -	+, -	У2, У1
Вентиляторов, насосов	S1	QT	3:1 вниз	2,4,6,8	411	F	-	-	У2
Компрессоров	S1	HS+QT	3:1 вниз	2,4,6,8	411	F	-	-	У2
Конвейеров	S1, S3	CT	5:1 вниз	4,6,8	416	F	-	-	У2
Прокатно-металлургический	S1, S3	HS+CT	10:1 вниз	4,6,8	410	H	-	-	У2
Горно-добывающей техники	S3	2CT	10:1 вниз	6,8	416	F	-	+	У1
Металлорежущих станков (главного движения)	S1	CT+CP	10:1 вниз 2:1 вверх	2,4	416	F	+	+, -	У2
Червячных прессов	S1	LT	10:1 вниз	4,6	411	F,H	-	-	У2
Подъемного транспорта	S3	CT	5:1 вниз	4,6	416	F	-	+	У2
Транспорта	S1,S2	CT+CP	10:1 вниз 10:1 вверх	4,6,8	416, 71W	H	+	-	У1

Примечание: 2 – двухквadrантная нагрузка; QT – квадратичная (вентиляторная) нагрузка; CT – нагрузка с постоянством момента; CP – нагрузка с постоянством мощности; LT – нагрузка с линейной зависимостью момента от частоты вращения; HS – тяжелый пуск; ДС – датчик скорости; Т – пристроенный тормоз; IC – тип вентиляции по МЭК 60034-6-2012.

С одной стороны, ГОСТ Р52776-2007 предлагает использование электродвигателя в режимах S1-S10, при этом режимы S2, S3, S5 подразумевают стоянку машины без нагрузки и электропитания, S6, S7 – периодическое изменение нагрузки. Режимы S8, S9, S10 предполагают изменение частоты вращения. С другой стороны, разработчик электродвигателей не может предусмотреть и предоставить потребителю номинальные данные для всех режимов работы. Кроме того, большинство механизмов с переменной производительностью фактически работают в режимах S1, S2, S3, S6 на различных частотах, а также в режиме S9. При этом пуск и торможение частотно-регулируемых двигателей проходит при токоограничениях 150% - 200% от номинального тока, вместо 600% - 900% токовых перегрузках, характерных

для прямых пусков, а значит, возможно ограничить декларируемые номинальные режимы работы, для которых приводятся данные режимами S1, S2, S3. Однако при этом необходимо указывать данные основных электромеханических характеристик не только на номинальной частоте, но и на промежуточных частотах вращения. Мощность в режиме S1 является базовой, но должна быть дополнена функциональными зависимостями $P_2(n)$, $M(n)$ или $P_2(f_1)$, $M(f_1)$, в зонах постоянства момента и постоянной мощности, механической характеристики, где P_2 – механическая мощность, M – момент нагрузки, n – частота вращения, f_1 – частота питания обмотки статора. Мощность машины в кратковременном и повторно-кратковременном режимах S2, S3 целесообразно определять по формулам [67, 205, 210]:

$$P_{S2} = P_{S1} \sqrt{\frac{1}{1 - e^{-\frac{\Delta t_P}{T}}}}, \quad (2.1)$$

$$P_{S3} = P_{S1} \sqrt{1 + \frac{\left(1 - \frac{\text{ПВ}}{100}\right) \beta_0}{(1 - K_0) \frac{\text{ПВ}}{100}}}, \quad (2.2)$$

где P_{S2} – мощность в режиме S2, Δt_P – время работы в режиме S2, T – постоянная времени обмотки электродвигателя, P_{S3} – мощность в режиме S3, P_{S1} – мощность в режиме S1, K_0 – коэффициент, характеризующий отношение мощности потерь холостого хода к потерям при нагрузке, β_0 – коэффициент изменения теплоотдачи при стоянке двигателя. Коэффициенты K_0 и β_0 и ориентировочные значения T для различных высот оси вращения и полюсностей электродвигателей приведены в таблице 2.2.

Электронные инверторы, предназначенные для питания частотно-регулируемых двигателей в силу неидеального преобразования рода тока, не позволяют получить выходное напряжение, равное входному в рабочем режиме. Работа электродвигателя при пониженном напряжении приводит к увеличению потребляемого тока. Это увеличение невелико при номинальных частотах питания, однако резко возрастает при увеличении частоты. Растет тепловая нагрузка на элементы машины, протяженность зоны постоянства мощно-

сти механической характеристики уменьшается. Поэтому при разработке частотно-регулируемых электродвигателей необходимо учитывать падение напряжения в инверторе, возникающее при преобразовании рода тока.

Таблица 2.2. Коэффициент потерь и коэффициент ухудшения вентиляции при стоянке, постоянная времени нагрева общепромышленных двигателей серий АИР(М), 5А(М), 7АВЕ

Высота оси вращения, мм	K_0				β_0			
	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$
80	0,15	0,19	0,20	0,26	0,28	0,28	0,28	0,28
112	0,20	0,25	0,22	0,18	0,30	0,30	0,31	0,28
132	0,18	0,22	0,17	0,17	0,32	0,31	0,31	0,28
160 - 180	0,20	0,21	0,23	0,17	0,32	0,31	0,31	0,30
200 - 250	0,21	0,23	0,23	0,22	0,32	0,31	0,35	0,32
280 - 315	0,25	0,30	0,31	0,32	0,32	0,32	0,39	0,40
$T, \text{ мин}$								
	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$				
80	11-13	10-11	10	11				
112	15-20	18-20	16-20	25				
132	20-25	20	20	25				
160 - 180	25-30	22-30	22-30	30-35				
200 - 250	35-45	32-44	33-43	35-43				
280 - 315	60-80	55-65	60	60				

Считая напряжение в звене постоянного тока в рабочем режиме равным $U_{ЗПТ}=520\text{В}$, частоту модуляции $f_k=5\text{кГц}$, мертвое время переключения транзисторов стойки инвертора $T_M=4\text{мкс}$ и пренебрегая падением на полупроводниковых приборах инвертора и выпрямителя, рассчитаем величину действующего фазного напряжения:

$$U_{1\Phi} = \frac{\sqrt{2}U_{\text{СЕТИ}} \cdot 0,97}{\sqrt{3}\sqrt{2}} k_{\text{и}} = \frac{U_{\text{ЗПТ}}}{\sqrt{3}\sqrt{2}} k_{\text{и}} \approx 208\text{В}, \quad (2.3)$$

где $U_{\text{СЕТИ}}$ – линейное напряжение сети переменного тока, $k_{\text{и}}$ – коэффициент использования напряжения инвертора, равный:

$$k_{\text{и}} = \frac{T_K - T_M}{T_K} = 0,98,$$

$T_K=1/f_k$ – период модуляции. Номинальное значение действующего линейного напряжения питания электродвигателя при его работе от преобразователя частоты, включенного в сеть 380В, 50Гц, не может превышать значения

$U_1 = \sqrt{3}U_{1\phi} = 360\text{В}$. Это означает, что двигатель не может иметь номинальные параметры питания 380В, 50Гц.

На рис. 2.4 приведены типовые частотные зависимости основных электро-механических параметров: напряжения, магнитного потока, мощности, момента – для трех различных случаев. Случай первый – идеальное преобразование напряжения $U_1=U_{\text{нд}}=U_{\text{н}}$; равенство максимального действующего напряжения, получаемого от инвертора, напряжению номинальных данных электродвигателя (на которые он проектируется) $U_{\text{нд}}$ и номинальному напряжению серийного двигателя $U_{\text{н}}$. Этот случай будет соответствовать использованию, например, серийного двигателя с номинальным напряжением 380В, 50Гц при питании от преобразователя, способного генерировать 380В, 50Гц под нагрузкой.

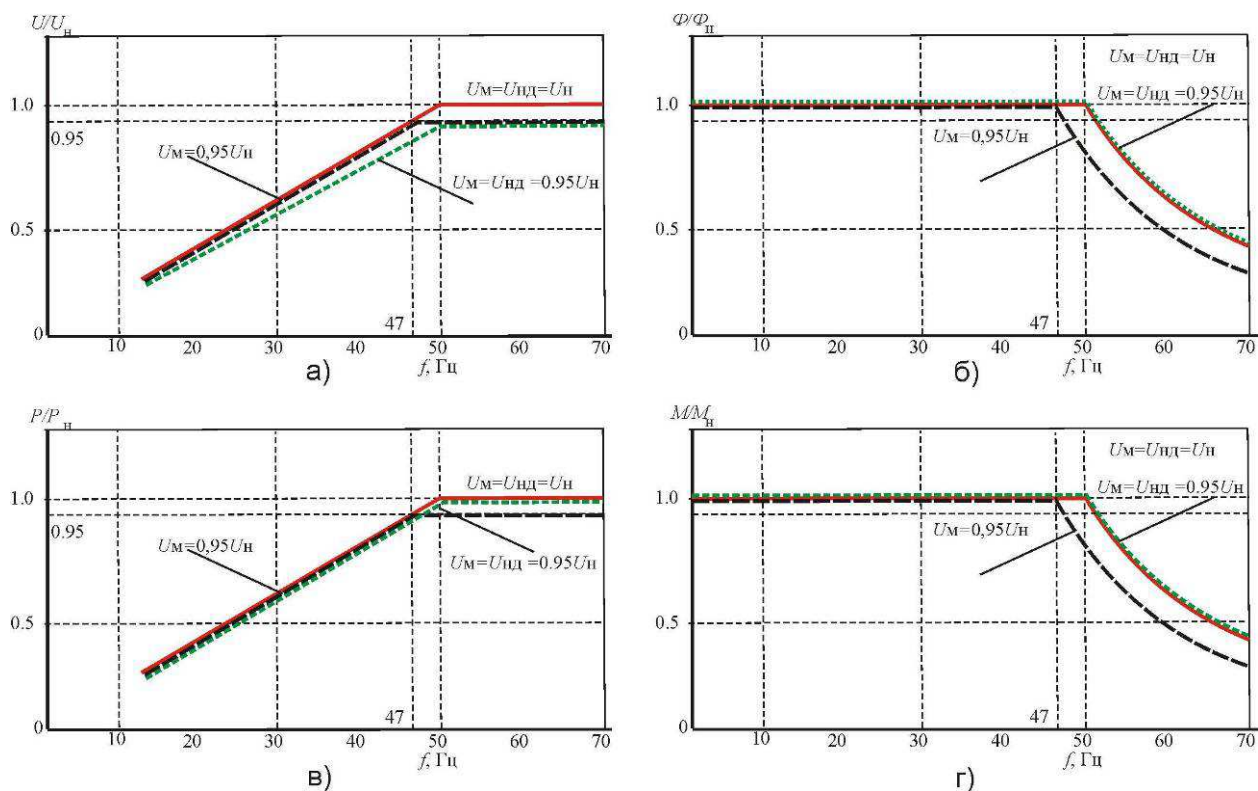


Рис. 2.4. Типовые частотные зависимости:
а – напряжения питания; б – магнитного потока;
в – мощности; г – момента от частоты питания

В связи с фактическим 6% падением напряжения в инверторе существование такого случая невозможно, поэтому возникают второй и третий случаи. Второй случай – $U_1=0,95U_{\text{н}}$, когда серийный электродвигатель с номинальными параметрами питания 380В, 50Гц получает питание от преобразо-

вателя, способного генерировать максимальное действующее напряжение 360В. В этом случае, необходимо перенести номинальную частоту электродвигателя с 50Гц на 47Гц, что компенсирует магнитный поток машины до его номинального значения. Мощность на номинальной частоте для этого случая окажется ниже, чем у аналогичного общепромышленного двигателя, на 6%, но момент и его кратность сохранятся. Для того чтобы скомпенсировать потерю мощности, необходимо изменить обмоточные данные электродвигателя так, чтобы его электрохимические характеристики соответствовали третьему случаю $U_1=U_{нд}=0,95U_n$. Когда новые обмоточные данные соответствуют номинальному напряжению 360В и 50Гц.

В машинах, работающих от электронного инвертора частотного преобразователя, из-за высокочастотной коммутации напряжения увеличиваются потери. Величина суммарного увеличения потерь зависит от гармонического состава тока и может быть представлена с помощью суммарного коэффициента гармонических искажений тока K_Γ , аналогичного *THD (total harmonic distribution)*. По данным ряда отечественных и зарубежных исследователей [4, 5, 100-102, 239, 257, 292], данная величина составляет 5-10%. По данным, полученным на основании многочисленных испытаний, проведенных в испытательном центре ПАО «НИПТИЭМ», современные преобразователи частоты с качественными алгоритмами ШИМ обеспечивают величину $K_\Gamma < 5\%$. Это соответствует увеличению значения превышения температуры обмотки статора на величину:

$$\Theta_{CU1}^{пч} = \Theta_{CU1}^{\sin} \left(1 + \frac{K_\Gamma}{100} \right)^2, \quad (2.4)$$

где $\Theta_{CU1}^{пч}$ – значение превышения температуры обмотки статора в двигателе при его питании от инвертора преобразователя частоты с ШИМ; $\Theta_{CU1}^{\sin}$ – значение превышения температуры обмотки статора в двигателе, питающемся от синусоидальной сети переменного тока. Испытания подтверждают 10%-е увеличение превышения температуры обмотки статора при питании электродвигателя от преобразователя частоты с ШИМ. Величина суммарного увеличения потерь, рекомендованная документами МЭК [257], составляет 15% – 2,5% для увеличе-

ния электрических потерь в обмотке статора, 4,5% для увеличения электрических потерь в обмотке ротора, 8% для увеличения магнитных потерь в сердечниках. Такое увеличение потерь в элементах равносильно дополнительному нагреву обмотки статора на 23% – 10% с учетом коэффициентов влияния потерь на нагрев обмотки статора. Подробности указанного расчета изложены в главе 4.

Поэтому целесообразно ввести сервис-фактор машины, обеспечивающий запас по нагреву на уровне не ниже 1,10 – 1,15 [122].

Обобщая результаты, касающиеся номинальных параметров частотно-регулируемых двигателей, предлагается следующий вариант декларации номинальных данных. В качестве основного номинального режима для электродвигателя предлагается режим S1, для него приводится значение мощности, которая понимается как длительная номинальная мощность. Ее значение должно быть обеспечено тепловым режимом машины при сервис-факторе двигателей с ВОВ 112-160мм – 1,15, с ВОВ 180-315мм – 1,1. При этом учитывается, что электродвигатель питается напряжением с суммарным коэффициентом гармонических искажений не выше 5%, что приводит к увеличению нагрева обмотки статора на 10%. Таким образом, суммарный сервис-фактор, получаемый для машины, питаемой от сети переменного тока, должен составлять 1,21 и 1,15 для ВОВ 112-160мм и 180-315мм соответственно.

Требуемый диапазон регулирования частоты вращения ротора электродвигателя – важная особенность различных технических приложений, его величина должна быть обеспечена как характеристиками устройств информационно – управляющего уровня, так и характеристиками электродвигателя. Известно, что на величину диапазона регулирования наибольшее влияние оказывает способ управления частотой вращения и моментом. Однако, как показывает практика, параметры электрической машины в формировании протяженности диапазона регулирования играют не последнюю роль.

Минимальная частота вращения ротора электродвигателя, ограничивающая диапазон регулирования снизу, с одной стороны, ограничена синхронными и асинхронными моментами от зубцовых гармоник [16]. С другой стороны,

длительно отводимая механическая мощность при регулировании вниз зависит от величины и распределения потерь между основными элементами машины. Кратность максимального момента, ограничивающая диапазон регулирования сверху, зависит не только от типа управления, но и от величины активных и индуктивных сопротивлений [59]. Максимальная частота вращения электродвигателя определяется механическими параметрами конструкции – критическими частотами. Мощность при регулировании вверх также ограничивается величиной и распределением потерь энергии по элементам машины.

Остановимся на вопросе необходимой кратности максимального момента частотно-регулируемого электродвигателя. При эксплуатации нерегулируемого асинхронного электропривода величины кратностей пускового и максимального момента являются решающими в выборе двигателя. Возможность использования электродвигателя для приведения в движение заданного механизма определяется на основе соотношений, полученных при интегрировании механических характеристик двигателя и нагрузки, они же определяют время пуска, потери и нагрев при разгоне. Поэтому запасы по пусковому, максимальному и минимальному моментам важны, а соответствующие кратности – критические характеристики машины.

В регулируемом электроприводе ситуация складывается иначе. Величина кратности пускового момента в нем не представляет интереса, так как не определяет величину пускового момента, а величина кратности максимального момента не определяет максимальный момент электропривода. Величиной, определяющей кратность пускового и максимального момента, в частотно-регулируемом электроприводе становится кратность тока преобразователя. Ведущие отечественные и зарубежные производители декларируют величину кратности тока преобразователя 120% - 200% [183-185, 190, 207], именно эта величина определяет величины пускового и максимального момента электропривода. На сегодняшний день применение преобразователей частоты, инвертор которых бы допускал возможность даже кратковременной работы с пятикратной величиной тока, экономически нецелесообразно. Поэтому кратность

максимального момента становится величиной, определяющей максимальный момент электропривода только при частотах вращения выше номинальной, т.е. когда значение тока при максимальном моменте становится ниже токоограничения преобразователя. Типовое семейство механических характеристик асинхронного двигателя в частотно-регулируемом электроприводе для номинального режима и режима перегрузки показано на рис. 2.5.

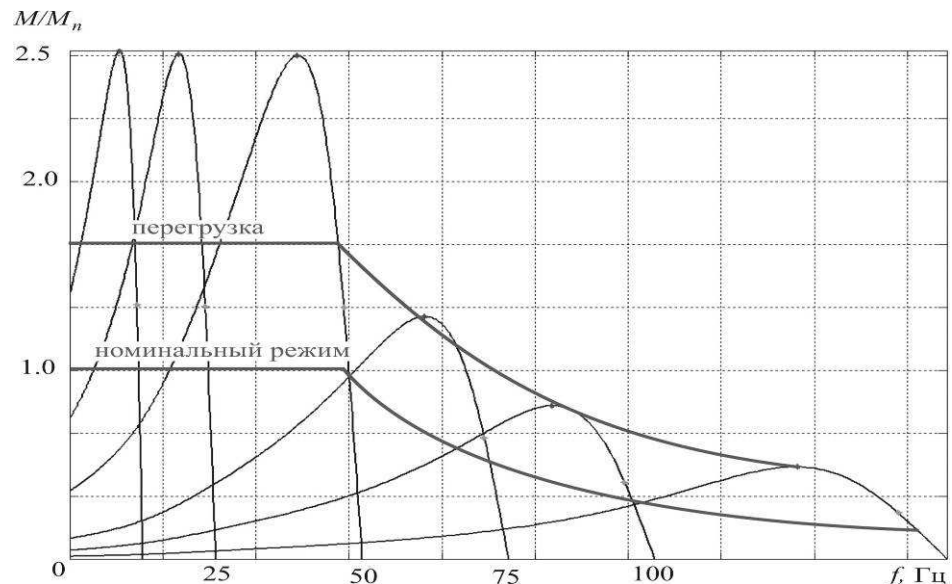


Рис. 2.5. Семейство механических характеристик асинхронного двигателя в частотно-регулируемом электроприводе

Представленное соотношение нагрузочной и перегрузочной характеристик двигателя в электроприводе, показанное совместно с семейством механических характеристик на фиксированных частотах питания, наглядно иллюстрирует зоны регулирования (с постоянством момента, с постоянством мощности). Номинальная частота питания двигателя также может быть определена из представленных зависимостей, как точка, в которой происходит переход в зону постоянной мощности, характеризующуюся постоянным напряжением питания.

Несложно установить, что кратность максимального момента асинхронного двигателя при регулировании вверх от номинальной частоты питания f_H уменьшается обратно пропорционально увеличению частоты питания, т. е.:

$$K_M(f) \cong \frac{K_M(f_H) f_H}{f}. \quad (2.5)$$

Поэтому, чтобы гарантированно нагружать двигатель, например, на двойной частоте номинальной мощностью, необходимо иметь на ней кратность максимального момента не менее $K_M(2f_H) \geq 1,3$, а при номинальной частоте не менее $K_M(f_H) \geq 2,6$.

Важным аспектом применения асинхронных двигателей является возможность кратковременной работы частотно-регулируемого электродвигателя от промышленной сети в случае аварии. Особенно это важно для насосных, компрессорных и вентиляторных приложений. Поэтому целесообразно регламентировать величину кратности пускового момента K_{II} без ограничения, наложенного на кратность пускового тока, необходимой для аварийного запуска.

Требования, предъявляемые к величинам кратностей максимального и пускового момента, с учетом работы в режиме S3, обобщены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Необходимая кратность максимального момента частотно-регулируемых электродвигателей

	K_M					K_{II}
	ПВ 100% $f_1=47Гц$	ПВ 100% $f_1=100Гц$	ПВ 60% $f_1=47Гц$	ПВ 40% $f_1=47Гц$	ПВ 25% $f_1=47Гц$	
$2p=2$	2,6	1,3	2,3	2,1	1,8	1,5
$2p=4$	2,5	1,3	2,2	2,0	1,7	1,5
$2p=6$	2,5	1,3	2,2	2,0	1,7	1,5
$2p=8$	2,4	1,3	2,1	1,9	1,6	1,5

На основе представленных требований и предпосылок в период с 2006-2008гг. автором были разработаны активные части электрических машин, положенные в основу серии частотно-регулируемых асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором широкого применения. В разработке серии также принимали участие А.М. Зайцев, А.С.Кобелев, О.В. Кругликов, С.В. Кудряшов и многие другие. Результаты разработки были освещены в работах [67, 68, 78, 80, 191] и обсуждались на конференциях. На основе результатов проектирования была создана платформа активных частей и конструктивных решений, раздел специализированной базы данных, с помощью которых были разработаны крановые электродвигатели серии 7FMTK, определены номинальные характеристики серии АДЧР, разработана серия АЧ, а

также специальные электрические машины для транспорта, горной техники и других применений.

Прежде чем перейти к рассмотрению и анализу результатов разработки, необходимо привести следующее замечание, влияющее на оценку предложенных проектных вариантов. В системе преобразователь частоты – электродвигатель важное значение имеют величины индуктивного сопротивления рассеяния ротора и статора, так как они оказывают влияние на амплитуду модуляционных пульсаций тока, увеличивающую суммарный коэффициент гармонических искажений тока, величина которого повышает потери при питании машины от источника с широтно-импульсной модуляцией. Снижение амплитуды пульсационных токов за счет увеличения частоты несущей широтно-импульсной модуляции приводит к увеличению динамических потерь в силовых ключах, усугублению негативных волновых процессов в обмотке статора, уменьшению критической длины кабеля между машиной и инвертором [18], в конечном итоге, необходимости увеличивать изоляционную прочность обмотки электродвигателя и класс силовых ключей.

Амплитуда модуляционных пульсаций тока Δi пропорциональна производной тока во времени, зависит от периода коммутации и величины напряжения. Наибольший интерес представляет зависимость амплитуды пульсаций тока от напряжения. Анализ передаточных функций [12, 216, 233] и результатов компьютерного моделирования позволяет утверждать, что для снижения амплитуды модуляционных пульсаций тока необходимо повышать величины индуктивных сопротивлений ротора и статора. Что, в свою очередь, приводит к снижению максимального момента электродвигателя. Поэтому при разработке активных частей частотно-регулируемых двигателей необходимо минимизировать запас по максимальному моменту.

В настоящее время довольно затруднительно разработать серию частотно-регулируемых двигателей, имеющую высокий потенциал освоения промышленностью без опоры на существующую номенклатуру общепромышленных машин. Это объясняется необходимостью использования суще-

ствующего производства для изготовления машин, которое имеет специализированное станочное, технологическое и измерительное оборудование, а также индустриальный опыт. Кроме того, расчет и проектирование электродвигателей, как правило, опирается на множество эмпирических данных, сформированных технологическими особенностями производства, т.е. ориентировано на конкретного производителя. Поэтому необходимо проектировать серию частотно-регулируемых электродвигателей на базе существующей серии 5А (АИР), а также на базе геометрии активной части разрабатываемой ПАО «НИПТИЭМ» энергоэффективной серии 7AVE [19, 120, 107]. Это означает, что необходимым условием является использование имеющихся корпусных деталей и технологического оборудования, применяемых при производстве общепромышленных электродвигателей указанных серий. Следовательно, внешние и внутренние диаметры статора и ротора, а также число пазов статора не изменяются, кроме того, максимальная длина пакета статора ограничивается соответствующими посадочными размерами существующих и вновь разрабатываемых станин для машин общепромышленного назначения. Изменяемыми параметрами двигателя являются: длина пакета, число пазов, форма и размеры паза ротора, обмоточные данные статора.

Рассмотрим варианты, разработанные в соответствии с тактикой последовательных модификаций:

Вариант 1. Исходный вариант общепромышленного электродвигателя, при питании от сети переменного тока.

Вариант 2. Исходный вариант общепромышленного двигателя, при питании от преобразователя частоты с ШИМ.

Вариант 3. Вариант электродвигателя с измененными обмоточными данными, при питании от преобразователя частоты с ШИМ.

Вариант 4. Вариант двигателя с измененными обмоточными данными и длиной пакета, при питании от преобразователя частоты с ШИМ.

Вариант 5. От одного до трех подвариантов электродвигателя с измененными обмоточными данными, длиной пакета и пазовой зоной, при пита-

нии от преобразователя частоты с ШИМ. При этом рассматривались несколько возможных соотношений чисел пазов ротора.

В основу разработки вариантов активных частей серии был положен подход, при котором анализировались комплексные показатели системы. Для чего был выбран ряд номинальных значений тока: 5,3; 7,2; 9,4; 12,9; 17,5; 25,5; 34,6; 42; 50; 67; 80; 96; 115; 150; 180; 210; 250; 300; 370; 460 (см. главу 7); установлена возможная длительная и кратковременная перегрузки по току 5% и 150%. Установлены контролируемые параметры для разрабатываемого двигателя, а именно: кратность максимального момента в различных режимах, в соответствии с табл. 2.3; КПД; $\cos\varphi$; ток в номинальном режиме и при максимальном моменте на частотах питания: 10, 25, 50, 100 Гц; масса активных частей основных элементов (обмотки статора, обмотки ротора, сердечников); стоимость материалов активной части. В результате перебора проектных вариантов находился компромисс, попадающий в ограничения по установленным параметрам электродвигателя и преобразователя и обеспечивающий минимальную стоимость активных частей. Исследования проводились для электродвигателей с ВОВ 112-315мм, $2p=2,4,6,8$, в качестве базового варианта 1 выбирался общепромышленный закрытый обдуваемый двигатель серии 5А(АИР).

Исследования характеристик, полученных для вариантов 1-2, которые соответствуют двигателям существующей серии 5А(АИР) при работе в ненормальных режимах и питании от преобразователя частоты с ШИМ, показали, что серийные двигатели не могут обеспечить требуемый диапазон регулирования 10:1 вниз, 2:1 вверх. Варианты 3–5, являющиеся модификацией общепромышленных машин, обеспечивают работу в заданном диапазоне. Лучшие характеристики были получены в варианте 5, для которого была получена максимальная экономия активных материалов, составляющая до 27%, а экономия установочной мощности преобразователя составила от 4% до 6%, что позволило, в некоторых случаях (работа при ПВ 25%), снизить габаритную мощность преобразователя. Проведенные исследования расширили известные результаты, [16, 180, 261] полученные на единичных типоразмерах.

В таблице 2.4 приведены основные конструктивные параметры электродвигателей 5AF280M4 и 5AF315S4 с различными вариантами радиальной и аксиальной геометрии. В таблице 2.5 представлены основные энергетические параметры двигателей 5AF280M4 и 5AF315S4, получаемые при различных вариантах активных частей машины и режимах электропитания. Обозначения: «F» – частотно–регулируемый; «a» – без изменения активной части; «b» – без изменения геометрии штампа; «c» – с изменением геометрии штампа. Следует отметить, что приведенные обозначения были приняты подразделениями ПАО «НИПТИЭМ» и ООО «ПК «ВЭМЗ» для обозначения электрических модификаций частотно-регулируемых электродвигателей после обсуждения результатов представленной разработки.

Таблица 2.4. Основные конструктивные параметры электродвигателей

Тип	z_1/z_2	Тип паза ротора	L_1 , мм	$Da1/Di2$, мм	Масса активной части, кг		
					стали	меди	алюминия
5AF280M4 (Вар 1 – Вар 3)	60/50	Двойная клетка	360	490/315	331,5	84,3	23,1
5AF280M4 (Вар 4)	60/50	Овальный паз	290	490/315	268,0	79,5	21,9
5AF280M4 (Вар 5)	60/68	Овальный паз	260	490/315	240,4	74,7	20,6
5AF315S4 (Вар 1 – Вар 2)	60/50	Двойная клетка	315	530/340	327,4	108,2	27,5
5AF315S4 (Вар 3)	60/50	Двойная клетка	360	530/340	374,2	118,3	29,9
5AF315S4 (Вар 4)	60/50	Овальный паз	320	530/340	331,5	110,8	30,75
5AF315S4 (Вар 5)	60/68	Овальный паз	300	530/340	310,9	107,3	29,6

Анализ данных таблиц 2.4, 2.5 позволяет сделать вывод о том, что наибольшая экономия активных материалов электрической машины, а также установочной мощности преобразователя достигается при использовании машины с простой клеткой ротора и соотношением зубцов $z_2 > z_1$ без скоса пазов из допустимых соотношений [47, 58, 186, 196]. В таблицах 2.6-2.9 представлены основные расчетные данные частотно-регулируемых двигателей электрических модификаций «a» и «c» соответствующие вариантам 2 и 5, полученные для номинальной точки в режиме S3 при ПВ 100% - 25% и системе вентиляции IC411.

Таблица 2.5. Основные энергетические параметры электродвигателей

Тип	U_1 , В	f_1 , Гц	IC416								
			P_2 , кВт	n , об/мин	КПД, %	$\cos\varphi$	M , Нм	M_M , Нм	I_1 , А	I_0 , А	I_M , А
5AFa280M4 (Вар 1)	79	10	27	283	87,6	0,88	908	1753	254	61	744
	192	25	66	735	94,1	0,88	857	2049	239	57	800
	380	50	132	1485	96,0	0,88	849	2162	237	56	872
	380	100	132	2939	93,7	0,66	428	538	322	23	373
5AFa280M4 (Вар 2)	75	10	27	281	86,1	0,88	917	1995	272	54	704
	182	25	66	733	93,7	0,88	860	1995	252	51	756
	360	50	132	1483	95,9	0,88	850	2057	250	50	770
	360	100	132	2953	94,9	0,79	427	486	282	21	355
5AFb280M4 (Вар 3)	75	10	27	285	88,0	0,88	904	2062	267	70	467
	181	25	66	736	94,2	0,88	856	2269	253	63	865
	360	50	132	1486	96,1	0,88	848	2374	250	62	887
	360	100	132	2956	94,5	0,73	426	554	306	25	408
5AFb280M4 (Вар 4)	75	10	27	284	86,5	0,93	908	2066	258	69	842
	182	25	66	735	93,8	0,92	857	2476	242	61	958
	360	50	132	1485	96,0	0,92	848	2631	239	58	993
	360	100	132	2967	95,2	0,90	425	636	246	22	481
5AFc280M4 (Вар 5)	76	10	27	282	84,9	0,93	914	1989	259	70	810
	183	25	66	734	93,2	0,93	859	2427	240	60	938
	360	50	132	1484	95,7	0,93	850	2583	238	56	976
	360	100	132	2963	94,8	0,91	425	644	246	20	279
5AFa315S4 (Вар 1)	80	10	32	285	87,2	0,88	1073	2004	301	67	739
	193	25	80	735	93,9	0,86	1039	2203	289	62	787
	380	50	160	1486	95,9	0,88	1028	2268	286	60	801
	380	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5AFa315S4 (Вар 2)	75	10	32	282	85,5	0,88	1083	1801	325	58	701
	182	25	80	733	93,4	0,88	1042	1973	307	54	746
	360	50	160	1484	95,7	0,88	1030	2029	303	53	758
	360	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5AFb315S4 (Вар 3)	74	10	32	288	89,5	0,89	1060	2471	314	94	972
	182	25	80	739	94,8	0,88	1034	2782	303	87	1048
	360	50	160	1489	96,2	0,88	1026	2873	302	83	1067
	360	100	160	2971	95,1	0,81	514	694	333	30	502
5AFb315S4 (Вар 4)	75	10	32	288	89,0	0,92	1060	2575	301	90	1028
	182	25	80	739	94,6	0,91	1034	2966	293	78	1135
	360	50	160	1489	96,2	0,91	1026	3106	292	75	1166
	360	100	160	2975	95,3	0,89	514	741	300	27	560
5AFc315S4 (Вар 5)	75	10	32	287	88,1	0,93	1064	2543	301	85	1024
	182	25	80	738	94,3	0,92	1035	3000	291	74	1149
	360	50	160	1488	96,1	0,92	1027	3168	289	71	1187
	360	100	160	2973	95,2	0,90	514	778	298	25	581

В таблице U_1 , f_1 – действующее значение и частота напряжения питания обмотки статора; P_2 – выходная (номинальная мощность); n – частота вращения; M – момент; M_M – максимальный момент; I_1 – номинальный ток статора; I_0 – ток холостого хода; I_M – ток при максимальном моменте.

Сравнение данных, приведенных в таблицах, свидетельствует об увеличении максимального момента двигателя модификации «с», а также о снижении рабочего тока, которое особенно явно проявляется при уменьшении ПВ в режиме S3.

Таблица 2.6. Основные энергетические параметры электродвигателей при различных ПВ в режиме S3

Тип	P_2 , кВт				n_H , об/мин				M_H , Нм				I_1 , А				M_M , Нм
	ПВ 100%	ПВ 60%	ПВ 40%	ПВ 25%	ПВ 100%	ПВ 60%	ПВ 40%	ПВ 25%	ПВ 100%	ПВ 60%	ПВ 40%	ПВ 25%	ПВ 100%	ПВ 60%	ПВ 40%	ПВ 25%	
5AFa112M2	7,5	8,5	10	11,5	2907	2892	2857	2838	25	28	35	39	15	17	21	24	74
5AFc112M2	7,5	8,5	10	11,5	2913	2899	2877	2853	24	28	33	38	15	17	20	23	86
5AFa132M2	11	12,5	14	17	2920	2905	2891	2857	36	41	46	57	21	24	28	35	111
5AFc132M2	11	12,5	14	17	2925	2913	2900	2874	36	41	46	56	21	24	27	33	127
5AFa160S2	15	17	19	22	2924	2910	2896	2872	49	56	63	73	30	34	38	45	129
5AFc160S2	15	17	19	22	2936	2925	2915	2898	49	55	62	72	29	33	37	43	158
5AFa160M2	18,5	21	23	27	2925	2911	2900	2875	60	69	76	90	36	41	46	55	162
5AFc160M2	18,5	21	23	27	2930	2920	2911	2891	60	69	75	89	35	40	44	52	187
5AFa180S2	22	25	27	32	2928	2915	2907	2884	72	82	89	106	42	48	53	64	203
5AFc180S2	22	25	27	32	2932	2921	2913	2893	72	82	88	106	42	48	52	63	217
5AFa180M2	30	33	37	44	2937	2929	2919	2900	97	108	121	145	56	62	70	85	318
5AFc180M2	30	33	37	44	2941	2934	2925	2908	97	107	121	144	57	63	70	84	344
5AFa200M2	37	41	46	54	2951	2944	2936	2921	120	133	150	176	66	77	87	104	345
5AFc200M2	37	41	46	54	2956	2952	2945	2934	119	133	149	176	69	76	85	101	439
5AFa200L2	45	50	56	65	2949	2942	2934	2913	146	162	182	213	83	94	106	125	411
5AFc200L2	45	50	56	65	2957	2951	2945	2934	145	162	182	211	83	92	103	120	567
5AFa225M2	55	61	69	80	2953	2946	2936	2922	178	198	224	261	101	115	124	156	455
5AFc225M2	55	61	69	80	2960	2954	2947	2937	177	197	223	260	99	112	127	148	570
5AFa250S2	75	84	94	109	2956	2949	2942	2930	242	272	305	355	135	155	174	205	680
5AFc250S2	75	84	94	109	2961	2955	2949	2939	242	271	304	354	134	152	170	199	787
5AFa250M2	90	101	112	131	2954	2947	2939	2926	291	327	364	427	162	185	207	248	778
5AFc250M2	90	101	112	131	2963	2958	2953	2944	290	326	362	425	159	181	201	237	1021
5AFa280S2	110	123	137	160	2960	2954	2947	2933	355	398	444	521	205	231	261	316	811
5AFc280S2	110	123	137	160	2966	2961	2956	2947	354	397	443	518	194	221	248	292	1119
5AFa280M2	132	148	165	192	2963	2956	2950	2938	425	478	534	624	238	273	309	369	1047
5AFc280M2	132	148	165	192	2971	2966	2962	2955	424	476	532	620	231	263	294	344	1544
5AFa315S2	160	179	200	233	2969	2964	2958	2948	515	577	646	755	287	328	371	445	1234
5AFc315S2	160	179	200	233	2973	2969	2965	2959	514	576	644	752	281	318	356	419	1659
5AFa315MA2	200	223	250	291	2972	2968	2963	2955	643	717	806	940	355	402	456	542	1684
5AFc315MA2	200	223	250	291	2976	2973	2969	2964	642	716	804	938	348	392	440	515	2329
5AFa315MB2	250	280	312	364	2975	2971	2967	2960	802	900	1004	1174	441	500	562	667	2306
5AFc315MB2	250	280	312	364	2980	2978	2975	2971	801	898	1001	1170	432	487	542	634	3539

Таблица 2.7. Основные энергетические параметры электродвигателей при различных ПВ в режиме S3

Тип	P_2 , кВт				n_H , об/мин				M_H , Нм				I_1 , А				M_M , Нм
	ПВ 100%	ПВ 60%	ПВ 40%	ПВ 25%	ПВ 100%	ПВ 60%	ПВ 40%	ПВ 25%	ПВ 100%	ПВ 60%	ПВ 40%	ПВ 25%	ПВ 100%	ПВ 60%	ПВ 40%	ПВ 25%	
5AFa112M4	5,5	6,5	7,5	9	1431	1413	1392	1346	37	44	51	64	11	14	16	22	108
5AFc112M4	5,5	6,5	7,5	9	1440	1427	1411	1381	36	43	51	62	12	14	16	20	127
5 AFa132S4	7,5	9	10	12	1450	1437	1427	1402	49	60	67	82	15	19	21	26	147
5AFc132S4	7,5	9	10	12	1456	1445	1437	1417	49	59	66	81	16	19	21	26	164
5 AFa132M4	11	13	14	17	1453	1442	1436	1415	72	86	93	115	22	26	28	36	233
5AFc132M4	11	13	14	17	1458	1448	1443	1425	72	86	93	114	23	27	29	36	254
5AFa160S4	15	17	19	23	1453	1444	1434	1408	99	112	126	156	31	36	41	53	231
5AFc160S4	15	17	19	23	1467	1461	1455	1443	98	111	125	152	30	34	38	47	296
5AFa160M4	18,5	21	24	28	1452	1443	1431	1410	122	139	160	190	38	43	51	63	287
5AFc160M4	18,5	21	24	28	1466	1460	1453	1442	120	137	158	185	37	42	48	57	362
5AFa180S4	22	25	28	34	1460	1452	1444	1424	144	164	185	228	44	51	58	74	353
5AFc180S4	22	25	28	34	1465	1459	1452	1438	143	164	184	226	44	50	56	70	459
5AFa180M4	30	34	39	46	1460	1453	1443	1426	196	223	258	308	59	68	79	99	545
5AFc180M4	30	34	39	46	1466	1460	1453	1441	195	222	256	305	58	67	77	93	655
5AFa200M4	37	41	46	54	1471	1467	1461	1450	240	267	301	356	73	82	93	114	557
5AFc200M4	37	41	46	54	1475	1472	1468	1461	239	266	299	353	71	78	88	105	781
5AFa200L4	45	50	56	66	1474	1470	1466	1457	291	325	365	432	88	99	112	135	760
5AFc200L4	45	50	56	66	1476	1473	1469	1462	291	324	364	431	86	95	107	127	994
5AFa225M4	55	62	69	81	1474	1470	1465	1453	357	403	450	532	109	124	141	175	766
5AFc225M4	55	62	69	81	1478	1475	1472	1465	355	401	448	528	103	117	130	154	1114
5AFa250S4	75	84	94	110	1482	1480	1477	1471	483	542	608	714	143	162	182	218	1210
5AFc250S4	75	84	94	110	1484	1482	1480	1476	482	541	606	712	139	155	174	205	1510
5AFa250M4	90	101	113	132	1481	1479	1476	1469	580	652	731	858	171	194	220	266	1289
5AFc250M4	90	101	113	132	1485	1483	1481	1477	579	650	729	853	166	186	208	245	1906
5AFa280S4	110	123	137	160	1481	1478	1474	1465	709	795	888	1043	212	242	276	343	1485
5AFc280S4	110	123	137	160	1484	1482	1479	1475	708	793	884	1035	200	224	250	295	2195
5AFa280M4	132	147	165	192	1483	1480	1477	1471	850	948	1067	1246	250	281	321	386	2057
5AFc280M4	132	147	165	192	1484	1481	1479	1475	850	947	1065	1243	238	267	300	353	2583
5AFa315S4	160	179	200	233	1484	1481	1477	1469	1030	1154	1293	1514	303	347	397	495	2029
5AFc315S4	160	179	200	233	1488	1486	1484	1481	1027	1150	1287	1502	289	325	364	427	3168
5AFa315M4	200	223	250	291	1485	1482	1479	1473	1286	1437	1614	1887	375	426	487	596	2703
5AFc315M4	200	223	250	291	1488	1486	1485	1482	1283	1432	1608	1875	360	403	453	531	4009

Таблица 2.8. Основные энергетические параметры электродвигателей при различных ПВ в режиме S3

Тип	P_2 , кВт				n_H , об/мин				M_H , Нм				I_1 , А				M_M , Нм
	ПВ 100%	ПВ 60%	ПВ 40%	ПВ 25%	ПВ 100%	ПВ 60%	ПВ 40%	ПВ 25%	ПВ 100%	ПВ 60%	ПВ 40%	ПВ 25%	ПВ 100%	ПВ 60%	ПВ 40%	ПВ 25%	
5AFa112MB6	4	5	6	7	950	932	909	873	40	51	63	77	9	11	14	18	108
5AFc112MB6	4	5	6	7	959	946	928	905	40	50	62	74	9	11	14	17	112
5AFa132S6	5,5	6,5	7,5	9	963	955	944	923	55	65	76	93	12	14	17	21	129
5AFc132S6	5,5	6,5	7,5	9	968	961	952	937	54	65	75	92	12	14	17	21	145
5AFa132M6	7,5	9	10	12,5	968	960	954	936	74	89	100	127	16	19	22	28	198
5AFc132M6	7,5	9	10	12,5	970	962	956	940	74	89	100	127	17	20	22	28	230
5AFa160S6	11	13	15	17	969	962	953	943	108	129	150	172	23	28	33	38	289
5AFc160S6	11	13	15	17	975	970	963	956	108	128	149	170	24	28	32	37	319
5AFa160M6	15	17	20	24	971	967	958	945	147	168	199	242	31	35	42	53	422
5AFc160M6	15	17	20	24	976	972	966	956	147	167	198	240	31	35	42	51	468
5AFa180M6	18,5	21	24	29	976	972	966	953	181	206	237	291	38	43	50	64	440
5AFc180M6	18,5	21	24	29	980	976	972	964	180	205	236	287	38	43	49	60	506
5AFa200M6	22	25	28	33	979	975	970	958	215	245	276	329	46	53	60	77	440
5AFc200M6	22	25	28	33	984	982	979	974	213	243	273	323	44	50	55	66	650
5AFa200L6	30	34	38	45	979	975	970	959	293	333	374	448	62	71	81	103	614
5AFc200L6	30	34	38	45	984	981	979	974	291	331	371	441	59	67	74	89	964
5AFa225M6	37	42	47	55	982	980	976	970	360	410	460	541	74	83	93	112	879
5AFc225M6	37	42	47	55	985	982	980	976	359	408	459	538	74	82	92	108	1159
5AFa250S6	45	51	57	67	985	982	979	971	436	495	556	659	90	103	118	149	879
5AFc250S6	45	51	57	67	988	986	984	980	435	494	553	653	85	97	109	129	1243
5AFa250M6	55	62	70	82	984	982	978	969	533	603	684	808	110	126	147	187	1044
5AFc250M6	55	62	70	82	987	985	983	979	532	601	680	800	104	117	133	159	1458
5AFa280S6	75	85	95	112	987	984	981	972	726	824	924	1100	149	172	198	263	1395
5AFc280S6	75	85	95	112	990	988	987	984	723	821	919	1087	140	159	177	211	2306
5AFa280M6	90	102	114	134	987	984	981	971	871	990	1110	1318	178	206	238	315	1668
5AFc280M6	90	102	114	134	990	988	987	984	877	985	1103	1300	167	190	212	145	2801
5AFa315S6	110	124	140	164	988	987	985	981	1063	1200	1358	1596	204	232	263	314	2496
5AFc315S6	110	124	140	164	990	988	986	983	1062	1199	1356	1593	204	231	261	308	2973
5AFa315MA6	132	149	168	197	987	985	983	979	1275	1444	1632	1921	243	276	314	377	2948
5AFc315MA6	132	149	168	197	990	989	987	985	1273	1438	1624	1910	244	274	309	365	3864
5AFa315MB6	160	180	203	240	987	985	983	979	1547	1744	1972	2341	293	332	378	457	3587
5AFc315MB6	160	180	203	240	990	988	987	984	1543	1739	1964	2329	293	330	373	445	4437

Таблица 2.9. Основные энергетические параметры электродвигателей при различных ПВ в режиме S3

Тип	P_2 , кВт				n_H , об/мин				M_H , Нм				I_1 , А				M_M , Нм
	ПВ 100%	ПВ 60%	ПВ 40%	ПВ 25%	ПВ 100%	ПВ 60%	ПВ 40%	ПВ 25%	ПВ 100%	ПВ 60%	ПВ 40%	ПВ 25%	ПВ 100%	ПВ 60%	ПВ 40%	ПВ 25%	
5AFa112MB8	3	3,7	4,5	5,5	712	699	678	-	40	51	63	-	8	10	12	-	101
5AFc112MB8	3	3,7	4,5	5,5	717	707	692	665	40	50	62	79	8	9	11	15	113
5AFa132S8	4	4,7	5,5	6,5	719	712	701	683	53	63	75	91	10	12	14	17	119
5AFc132S8	4	4,7	5,5	6,5	723	717	709	697	53	63	74	89	10	11	13	16	151
5AFa132M8	5,5	6,5	8	9,5	718	710	694	662	73	87	110	137	15	16	20	27	160
5AFc132M8	5,5	6,5	8	9,5	723	716	705	690	73	87	108	131	13	15	19	23	213
5AFa160S8	7,5	9	10	12	724	716	710	686	99	120	134	167	18	22	24	33	195
5AFc160S8	7,5	9	10	12	728	723	719	709	98	119	133	162	18	21	23	28	295
5AFa160M8	11	13	15	18	721	713	702	-	145	174	204	-	26	31	37	-	271
5AFc160M8	11	13	15	18	728	723	717	707	144	172	200	243	25	29	34	41	442
5AFa180M8	15	17,5	20	24,5	726	720	711	-	197	232	269	-	33	40	48	-	383
5AFc180M8	15	17,5	20	24,5	731	727	723	714	196	230	264	328	32	37	42	54	501
5AFa200M8	18,5	21	24	28	736	733	730	725	240	274	314	369	40	45	51	60	606
5AFc200M8	18,5	21	24	28	736	734	731	727	240	273	313	368	39	44	50	58	702
5AFa200L8	22	25	28	33	735	732	729	723	286	326	367	436	46	52	59	71	676
5AFc200L8	22	25	28	33	735	733	730	726	286	326	366	434	46	52	58	69	789
5AFa225M8	30	34	39	46	733	730	725	718	391	445	513	612	64	72	84	103	812
5AFc225M8	30	34	39	46	736	734	731	727	389	442	509	604	63	71	80	95	1132
5AFa250S8	37	42	48	56	741	740	738	735	477	542	621	727	81	90	103	121	1254
5AFc250S8	37	42	48	56	741	739	737	734	477	543	622	729	76	86	99	118	1259
5AFa250M8	45	51	58	69	741	740	738	734	587	658	751	897	96	108	122	149	1485
5AFc250M8	45	51	58	69	741	740	738	734	580	658	751	897	92	104	118	143	1600
5AFa280S8	55	62	70	82	740	738	736	732	710	802	908	1070	110	125	143	177	1348
5AFc280S8	55	62	70	82	742	741	740	737	708	799	904	1062	108	121	136	161	2039
5AFa280M8	75	85	96	112	740	737	734	727	969	1102	1249	1470	149	172	201	256	1665
5AFc280M8	75	85	96	112	742	741	740	738	965	1095	1239	1450	146	165	186	218	2837
5AFa315S8	90	102	115	135	740	739	737	734	1161	1318	1490	1757	175	198	228	275	2361
5AFc315S8	90	102	115	135	742	741	740	738	1157	1314	1484	1747	177	199	224	264	3113
5AFa315MA8	110	124	140	165	740	739	738	736	1418	1599	1810	2141	214	231	261	313	2875
5AFc315MA8	110	124	140	165	742	741	740	738	1415	1597	1807	2136	214	240	270	321	3745
5AFa315MB8	132	149	168	198	741	740	738	735	1701	1923	2173	2572	257	290	329	397	3668
5AFc315MB8	132	149	168	198	742	741	740	738	1697	1919	2167	2562	258	288	324	385	4527

Учитывая ограничения, накладываемые возможностями производства и скоростью освоения новых машин ПАО «НИПТИЭМ», было принято решение совместного повысотного освоения разработанных частотно-регулируемых электродвигателей и энергоэффективных машин серии 7AVE. В таблице 2.10 показана номенклатура габаритов двигателей, выпускаемых ПК «ВЭМЗ», где помечены позиции, имеющие освоенные производством активные части, специализированные для частотно-регулируемых машин. Аббревиатурой 5А помечены типоразмеры двигателей с активными частями, изготавливаемыми в рамках серий АИР, АИРМ, 5А, 5АМ. Аббревиатурой 7А показаны типоразмеры электродвигателей с активными частями, изготавливаемыми в рамках новой энергоэффективной серии 7AVE. Заметим, что овальные пазы ротора в общепромышленных двигателях габаритов 112, 132 могут быть приняты без изменения для частотного регулирования.

Таблица 2.10. Освоенные производством активные части асинхронных частотно-регулируемых электродвигателей

ВОВ, мм	112				132			
2р	2	4	6	8	2	4	6	8
серия	5А	5А	5А	5А	5А	5А	5А	5А
ВОВ, мм	160				180			
2р	2	4	6	8	2	4	6	8
серия		5А, 7А	5А	5А		7А		5А
ВОВ, мм	200				225			
2р	2	4	6	8	2	4	6	8
серия			7А	5А, 7А		5А		
ВОВ, мм	250				280			
2р	2	4	6	8	2	4	6	8
серия		7А	7А	5А		7А	5А, 7А	7А
ВОВ, мм	315							
2р	2	4	6	8				
серия								

Выводы по главе 2

1. При проектировании мехатронных систем для промышленности и транспорта важнейшим этапом является энергетический расчет, результаты

которого закладывают соответствие между получаемыми характеристиками проектного решения и заданными в технических условиях.

2. Этапы энергетического расчета мехатронных систем с двигателями переменного тока должны включать в себя разработку и анализ характеристик электрической машины.

3. Рациональный способ разработки электродвигателей переменного тока для мехатронных систем основан на тактике постепенной модификации электрической машины от базового общепромышленного двигателя, которая осуществляется на этапах энергетического синтеза. При этом постепенная модификация включает исследование статических и динамических характеристик мехатронной системы на этапах изменения активной и конструктивной частей электрической машины. Для электродвигателей переменного тока следует применять следующую схему последовательных модификаций: серийная машина – пристраиваемые узлы – модифицированные элементы оболочки – изменение обмотки статора – изменение пазовой геометрии ротора – изменение длины пакетов ротора и статора – изменение пазовой геометрии статора – изменение внешнего диаметра активной части машины и ее оболочки.

4. Разработка широкой номенклатуры базовых частотно-регулируемых двигателей позволяет повысить эффективность разработки электрических машин для мехатронных систем. Предложенная в работе серия частотно-регулируемых электродвигателей с ВОВ 112-315мм, $2p=2-8$ позволяет экономить до 25% в стоимости материалов активных частей машины и до 6% в установленной мощности преобразователей, эффективна для использования в качестве базовых машин мехатронных систем, что подтверждается ее освоением на предприятиях ПАО «НИПТИЭМ» и ООО «ПК «ВЭМЗ».

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

В основе аналитических исследований энергетических и управляющих процессов в мехатронных системах лежит математическое моделирование. При этом математические модели мехатронных систем включают в себя модели управляющих и силовых процессов и компонентов. Степень уточнения или упрощения соответствующего процесса или компонента определяется задачей. Для энергетического расчета мехатронных систем с двигателями переменного тока необходимо уточнение моделей энергетических процессов, которое определяется не только представлением электрической машины, но и достоверностью отражения управляющих процессов на энергетических характеристиках. Адекватность отражения электромеханических и управляющих процессов математическими моделями определяет корректность выводов, полученных в результате проведения аналитических исследований, и влияет на качество и временные затраты энергетического расчета. Поэтому применение моделей повышенной точности, использующих моделирование магнитных, тепловых и электрических полей на основе метода конечных элементов для их использования при проектировании мехатронных систем, затруднено с точки зрения повышенных временных затрат. Упрощенные модели мехатронных систем, построенные на основе структурных схем и использующие цепные методики представления электрических двигателей без учета существенной нелинейности магнитных, электрических и тепловых характеристик, не адекватно отражают энергетические характеристики в широком диапазоне изменения частоты вращения, нагрузки, режима питания, так как настроены на номинальный режим.

Уточнению математических моделей электрических машин, ориентированных на расчет процессов в мехатронных системах, посвящена данная глава работы.

3.1 Математическое описание электрического двигателя в составе мехатронной системы

Электромеханическое преобразование энергии, происходящее в электродвигателях мехатронных систем, является управляемым, а следовательно, связано как с энергетическими процессами, протекающими в преобразователях электрической энергии, так и с управляющими процессами и алгоритмами. Поэтому математические модели должны учитывать функциональные особенности, нелинейности и ограничения электрических преобразователей, а также алгоритмы систем управления.

Математические модели электрических машин могут быть построены на основе трех подходов [113]: методов теории цепей; методов теории поля; комбинации этих методов. В то же время математические модели электромеханических преобразователей с позиций теории автоматического управления могут быть разработаны на основе: моделей в виде передаточной функции; моделей в виде пространства состояний [41, 48, 204]. Таким образом, наибольшие перспективы с точки зрения построения математических моделей, соответствующих как электромеханике, так и теории автоматического управления, имеют модели машин, разработанные с помощью методов теории цепей, представленные в виде пространства состояний на основе систем дифференциальных уравнений.

Современные тенденции электромашиностроения диктуют требования увеличения технологичности, снижения себестоимости, что часто приводит к существенным отклонениям в электрической и магнитной симметрии между фазами электродвигателей, что необходимо учитывать при построении моделей.

3.2 Математические модели асинхронного двигателя

Важную роль при разработке математических моделей асинхронных электродвигателей играет тип координатной системы, применяемой при построении уравнений. Хорошо известны и изучены вращающиеся двухфазные

системы координат, применение которых позволяет, с одной стороны, избавиться от периодически изменяющихся коэффициентов в уравнениях математической модели, с другой стороны, уменьшает количество уравнений. Такие модели зарекомендовали себя при моделировании процессов и синтезе алгоритмов асинхронного электропривода [11, 12, 36, 38, 39, 61, 113, 189, 192, 195, 201, 216, 227, 240, 255, 263, 267, 268, 271, 272, 281, 295]. Однако такой подход исключает возможность моделирования ряда режимов, в том числе аварийных и несимметричных, которые являются интересными с точки зрения разработчиков электрических машин. Хороший результат в данном аспекте позволяют получить математические модели в трехфазной системе координат [9, 32, 66, 70, 71, 113, 114, 260, 279, 289].

Сравнительный анализ уравнений математических моделей в различных системах координат приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Характеристики координатных систем моделей АЭД

Тип питания	Симметрия электрической и магнитной систем	Схема соединения фаз	Тип координатной системы				
			Трехфазная			Двухфазная	
			A,B,C,0	AB,BC,CA	$\alpha,\beta,\gamma,0$	$\alpha,\beta,0$	d,q,0
синусоидальные	симметричные	Y	(5+2)	(5+2)	(5+1)	(4+1)	(4+1)
		Y ₀	(7+2)	-	(7+1)	(5+1)	(5+1)
		Δ	(6+2)	(6+2)	(6+1)	(4+1)	(4+1)
несинусоидальные	симметричные	Y	(5+2)	(5+2)	(5+1)	(4+1)	-
		Y ₀	(7+2)	-	(7+1)	(5+1)	-
		Δ	(6+2)	(6+2)	(6+1)	(4+1)	-
синусоидальные	несимметричные	Y	(5+2)	(5+2)	-	-	-
		Y ₀	(7+2)	-	-	-	-
		Δ	(6+2)	(6+2)	-	-	-
несинусоидальные	несимметричные	Y	(5+2)	(5+2)	-	-	-
		Y ₀	(7+2)	-	-	-	-
		Δ	(6+2)	(6+2)	-	-	-

Обозначения: (число дифференциальных уравнений электрических контуров + число дифференциальных уравнений механики); (-) – затруднено применение.

Анализ данных, приведенных в табл. 3.1, показал, что наибольшей универсальностью обладают модели в трехфазных естественных координатах, однако, количество уравнений в такой системе на (2+1) уравнение больше, чем в случае использования двухфазных $\alpha,\beta,0$ координат. Двухфазные $\alpha,\beta,0$ координаты являются оптимальными для исследования процессов в асинхронном

электроприводе, однако не позволяют моделировать процессы при несинусоидальных полях в двигателе, которые могут быть перспективны для мехатронных систем [113, 239, 246, 249, 254, 256, 269]. Таким образом, наиболее универсальной моделью асинхронного двигателя, предназначенного для использования в мехатронных системах, с помощью которой можно исследовать практически все интересующие разработчиков режимы, в том числе аварийные, является модель в естественных фазных координатах. Ее основной недостаток – большее количество уравнений, входящих в систему, необходимость использования периодически изменяющихся коэффициентов (матрица индуктивностей периодически изменяется с частотой вращения ротора) и, как следствие, отсутствие возможности аналитического решения и низкая скорость численного интегрирования. Однако указанный недостаток в условиях современного прогресса вычислительной техники потерял актуальность.

Уравнения асинхронной машины в естественных координатах можно представить в векторно-матричной форме [71]:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_1 = \mathbf{I}_1 R_1 + \frac{d\mathbf{\Psi}_1}{dt}; \\ \mathbf{U}_2 = \mathbf{I}_2 R_2 + \frac{d\mathbf{\Psi}_2}{dt}; \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_c - k_{\text{тр}} \Omega); \\ \frac{d\theta}{dt} = \Omega; \\ \gamma = p\theta, \end{cases} \quad (3.1)$$

где $\mathbf{U}_1$ – вектор мгновенных значений напряжения, приложенных к обмотке статора; $\mathbf{U}_2$ – вектор мгновенных напряжений, приложенных к обмотке ротора; $\mathbf{I}_1$ – вектор токов статора и $\mathbf{I}_2$ – вектор токов ротора; M – электромагнитный момент; M_c – момент сторонних сил (нагрузка); J – момент инерции ротора и приведенных к нему масс; θ – механическая угловая координата; γ – электрическая угловая координата; p – число пар полюсов; Ω – угловая частота вращения ротора; t – время; $k_{\text{тр}}$ – коэффициент механического сопротивления. Здесь и далее параметры роторной цепи приведены к обмотке ста-

тора. Электромагнитный момент рассчитывается по формуле:

$$M = p \mathbf{I}_1^T \left(\frac{\partial \mathbf{L}_{12}}{\partial \gamma} \right) \mathbf{I}_2, \quad (3.2)$$

где $\mathbf{L}_{12}$ – матрица взаимной индуктивности между статором и ротором. Вектор мгновенного потокосцепления, вычисляемый как:

$$\boldsymbol{\Psi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Psi}_1 \\ \boldsymbol{\Psi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{11} & \mathbf{L}_{12} \\ \mathbf{L}_{21} & \mathbf{L}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

где $\mathbf{I} = [\mathbf{I}_1 \quad \mathbf{I}_2]^T$ – вектор тока, $\mathbf{L}_{11}$ – матрица собственной индуктивности статора, $\mathbf{L}_{22}$ – матрица собственной индуктивности ротора, $\mathbf{L}_{21} = \mathbf{L}_{12}$ – матрица взаимной индуктивности. Матрицы индуктивностей определяются как:

$$\mathbf{L}_{11} = \begin{bmatrix} L_{1\sigma} + L'_m & -\frac{L'_m}{2} & -\frac{L'_m}{2} \\ -\frac{L'_m}{2} & L_{1\sigma} + L'_m & -\frac{L'_m}{2} \\ -\frac{L'_m}{2} & -\frac{L'_m}{2} & L_{1\sigma} + L'_m \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

$$\mathbf{L}_{22} = \begin{bmatrix} L_{2\sigma} + L'_m & -\frac{L'_m}{2} & -\frac{L'_m}{2} \\ -\frac{L'_m}{2} & L_{2\sigma} + L'_m & -\frac{L'_m}{2} \\ -\frac{L'_m}{2} & -\frac{L'_m}{2} & L_{2\sigma} + L'_m \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{L}_{12} = \mathbf{L}_{21} = \begin{bmatrix} L'_m c(\gamma) & L'_m c\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & L'_m c\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L'_m c\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & L'_m c(\gamma) & L'_m c\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L'_m c\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & L'_m c\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & L'_m c(\gamma) \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

где $L'_m = \frac{2}{3} L_m$ – взаимная индуктивность, приведенная к одной фазе трехфазной обмотки, $c(x) = \mathbf{A} \cos(nx)$; $\mathbf{A}$ – n -мерный массив амплитуд коэффициентов гармонического состава индуктивности при соответствующих гармониках.

Коэффициенты, входящие в уравнения математической модели, соответствуют параметрам T – образной схемы замещения (рис. 3.1), с активным сопротивлением обмотки статора $R_1 = const$, индуктивностью рассеяния статора $L_{1\sigma} = const$, которые считаются постоянными. Активное сопротивление обмотки ротора $R_2 = f(f_2)$, индуктивность рассеяния ротора $L_{2\sigma} = f(I_2, f_2)$, индуктивность контура намагничивания $L_m = f(I_m)$ считаются функциями соответствующих аргументов.

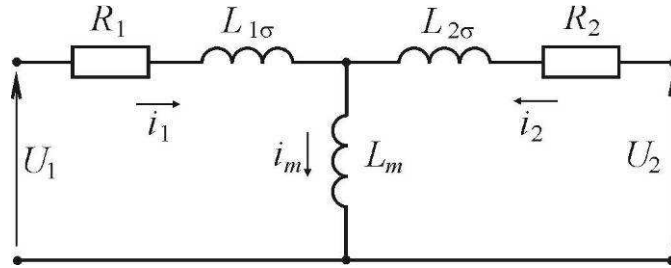


Рис. 3.1. Схема замещения фазы АЭД

Модуль вектора тока намагничивания, используемый при расчете индуктивности контура намагничивания, вычисляется с помощью выражения:

$$I_m = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \|\mathbf{I}_m\|_2, \quad (3.6)$$

в котором $\mathbf{I}_m = \mathbf{I}_1 + \mathbf{I}'_2$ вектор тока намагничивания; $\mathbf{I}'_2$ – заторможенный ток ротора, приведенный к статору. Вектор тока намагничивания вычисляется с помощью выражения [71]:

$$\mathbf{I}_m = \mathbf{I}_1 - \mathbf{I}'_2 = \mathbf{I}_1 - \left((\mathbf{I}_2)^T \begin{pmatrix} c(\gamma) & c\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & c\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ c\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & c(\gamma) & c\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ c\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & c\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & c(\gamma) \end{pmatrix} \right)^T. \quad (3.7)$$

На рис. 3.2 представлен пример зависимости параметров двигателя 5A225M4, полученный с помощью поверочного электромагнитного расчета.

Предложенная математическая модель характеризуется использованием сосредоточенных параметров для представления активных и индуктивных со-

противлений, однако допускает их вычисление на основе не только цепных, но и полевых методов. Допущения модели складываются из допущений, принятых при расчете параметров схемы замещения и погрешности использования формулы для расчета электромагнитного момента (3.2). Принятые допущения не учитывают магнитных потерь в сердечниках, представляют нелинейность магнитопровода, вызванного эффектом насыщения с помощью «насыщенных» индуктивностей, пренебрегают влиянием неравномерности и зубчатости воздушного зазора. Кроме того, в модели считается, что обмотка ротора имеет три фазы, а ее витки приведены к виткам трехфазной обмотки ротора (т.е. имеют одинаковое количество).

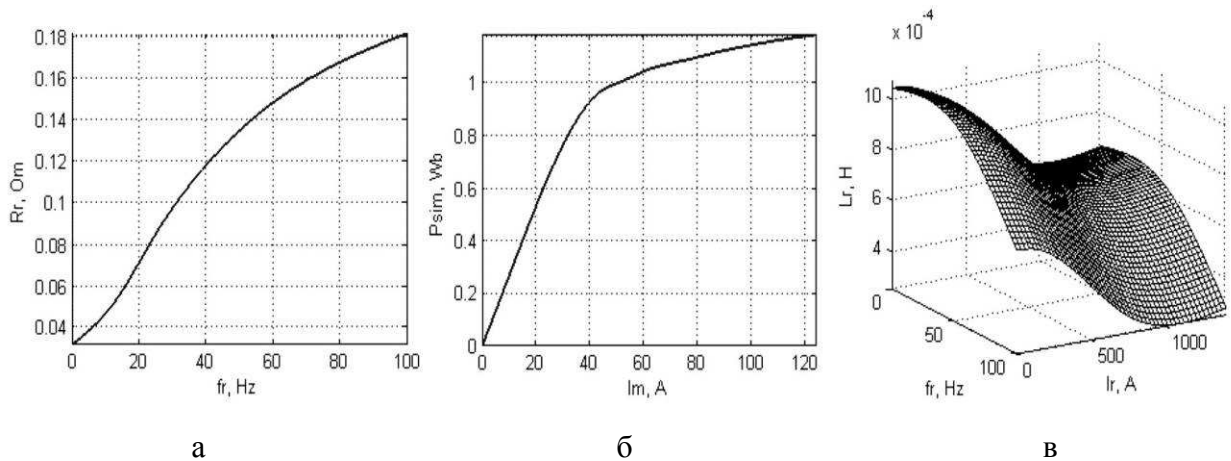


Рис. 3.2. Зависимости параметров схемы замещения двигателя 5A225M4:

а – зависимость активного сопротивления ротора от частоты тока в его обмотке; б – зависимость главного потокосцепления от тока намагничивания; в – зависимость индуктивности рассеяния ротора от частоты и амплитуды тока в его обмотках

Снятие указанных допущений требует определения индуктивностей, входящих в (3.3) полевыми методами, например, методом конечных элементов, а также вычисления электромагнитного момента энергетическим методом или способом на основе тензоров натяжения Максвелла [92, 213, 254].

Учесть несинусоидальность фазных токов при соединении обмоток статора в треугольник (Δ) можно на основе подхода, использующего разную величину взаимной индуктивности по фазным осям. Для этого целесообразно использовать матрицу индуктивностей статора вида:

$$\mathbf{L}_{11} = \begin{bmatrix} L_{1\sigma} + L'_m & -\frac{L'_m(I_{mB}, I_{mC})}{2} & -\frac{L'_m(I_{mC}, I_{mB})}{2} \\ -\frac{L'_m(I_{mA}, I_{mC})}{2} & L_{1\sigma} + L'_m & -\frac{L'_m(I_{mC}, I_{mA})}{2} \\ -\frac{L'_m(I_{mA}, I_{mB})}{2} & -\frac{L'_m(I_{mB}, I_{mA})}{2} & L_{1\sigma} + L'_m \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

где $L'_m(I_{mB}, I_{mC})$, $L'_m(I_{mC}, I_{mB})$, $L'_m(I_{mA}, I_{mC})$, $L'_m(I_{mC}, I_{mA})$, $L'_m(I_{mA}, I_{mB})$, $L'_m(I_{mB}, I_{mA})$ – функции индуктивностей с учетом насыщения от модуля тока намагничивания I_m в соответствии с (3.7) и его составляющих:

$$\begin{aligned} L'_m(I_{mB}, I_{mC}) &= \frac{2}{3}(L_m(I_m) + k_{VM}L(I_{mB}) - k_{VM}L(I_{mC})); \\ L'_m(I_{mC}, I_{mB}) &= \frac{2}{3}(L_m(I_m) + k_{VM}L(I_{mC}) - k_{VM}L(I_{mB})); \\ L'_m(I_{mA}, I_{mC}) &= \frac{2}{3}(L_m(I_m) + k_{VM}L(I_{mA}) - k_{VM}L(I_{mC})); \\ L'_m(I_{mC}, I_{mA}) &= \frac{2}{3}(L_m(I_m) + k_{VM}L(I_{mC}) - k_{VM}L(I_{mA})); \\ L'_m(I_{mA}, I_{mB}) &= \frac{2}{3}(L_m(I_m) + k_{VM}L(I_{mA}) - k_{VM}L(I_{mB})); \\ L'_m(I_{mB}, I_{mA}) &= \frac{2}{3}(L_m(I_m) + k_{VM}L(I_{mB}) - k_{VM}L(I_{mA})). \end{aligned} \quad (3.9)$$

Коэффициент k_{VM} учитывает влияние от фазных составляющих тока намагничивания. Его величина может быть определена с помощью сопоставления результатов моделирования пуска на основе цепных и полевых методов, проведенных для исследуемой машины, и составляет $k_{VM}=0,01\dots 0,02$ для общепромышленных электродвигателей серии 5А(АИР) с ВОВ 112-315мм производства ООО «ПК «ВЭМЗ».

Дополнительная точность результатов моделирования может быть получена при использовании вместо зависимостей статических индуктивностей

$$L_m(I_m) \text{ их дифференциальных аналогов } L_m = \frac{\partial \Psi_m}{\partial I_m}.$$

При моделировании соединения обмотки статора в звезду (Y) необходимо представлять уравнения напряжения статора системы (3.1) в виде:

$$\begin{cases} u_A - u_C = i_A R_A + \frac{d\Psi_A}{dt} + (i_A + i_B) R_C - \frac{d\Psi_C}{dt}, \\ u_B - u_C = i_B R_B + \frac{d\Psi_B}{dt} + (i_A + i_B) R_C - \frac{d\Psi_C}{dt}. \end{cases}$$

Если при соединении в звезду фазные обмотки симметричны, как и напряжения, подаваемые на эти обмотки, то матрица индуктивностей может быть упрощена:

$$\mathbf{L}_{11} = \begin{bmatrix} L_{1\sigma} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{1\sigma} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{1\sigma} + L_m \end{bmatrix}.$$

Для интегрирования системы дифференциальных уравнений (3.1) - (3.3) целесообразно использовать многошаговый метод Адамса-Маултона четвертого порядка. Решение вспомогательной системы нелинейных алгебраических уравнений необходимо проводить методом Ньютона-Рафсона [13, 115, 194, 200, 218], для чего следует преобразовать систему к виду:

$$\begin{cases} \Psi_1^j = \Psi_1^{j-1} + h\mathbf{U}_1^j - hR_1 \sum_{n=0}^q k_n \mathbf{I}_1^{j-n}; \\ \Psi_2^j = \Psi_2^{j-1} + h\mathbf{U}_2^j - hR_2 \sum_{n=0}^q k_n \mathbf{I}_2^{j-n}; \\ \Omega^j = \Omega^{j-1} + \frac{h}{J} \sum_{n=0}^q k_n T^{j-n} - \frac{h}{J} T_C^j; \\ \theta^j = \theta^{j-1} + h \sum_{n=0}^q k_n \Omega^{j-n}; \\ \gamma^j = p\theta^j, \end{cases} \quad (3.10)$$

где j – номер шага, h – величина шага, q – порядок приближения.

Невязка системы конечно-разностных уравнений модели АЭД рассчитывается по формуле:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \Psi_1^j - \left(\Psi_1^{j-1} + h\mathbf{U}_1^j - hR_1 \sum_{n=0}^q k_n \mathbf{I}_1^{j-n} \right) \\ \Psi_2^j - \left(\Psi_2^{j-1} + h\mathbf{U}_2^j - hR_2 \sum_{n=0}^q k_n \mathbf{I}_2^{j-n} \right) \\ \Omega^j - \left(\Omega^{j-1} + \frac{h}{J} \sum_{p=n}^q k_n T^{j-n} - \frac{h}{J} T_C^j \right) \\ \theta^j - \left(\theta^{j-1} + h \sum_{n=0}^q k_n \Omega^{j-n} \right) \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

Решение системы конечно-разностных уравнений следует искать в виде:

$$\mathbf{x} = [\mathbf{I}_1 \quad \mathbf{I}_2 \quad \Omega \quad \theta]^T. \quad (3.12)$$

Якобиан рассчитывается по формуле:

$$\frac{d\mathbf{F}}{d\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}^j + hk_0 \{R_s, R^j_R\} \delta^{ij} & 0 & \frac{d\Psi^j}{d\theta^j} \\ -\frac{h}{J} k_0 \frac{dT^j}{d\mathbf{I}^j} & 1 & 0 \\ 0 & -hk_0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

Решение (3.10) следует искать с помощью метода Ньютона, процесс которого можно представить в виде:

$$\mathbf{x}_v = \mathbf{x}_{v-1} - \left(\frac{d\mathbf{F}_{v-1}}{d\mathbf{x}} \right)^{-1} \mathbf{F}(\mathbf{x}_{v-1}), \quad (3.14)$$

где v – номер итерации. Коэффициенты, входящие в выражения (3.10), (3.11), (3.13), для метода Адамса-Маултона пятого порядка сведены в таблицу 3.2:

Таблица 3.2. Коэффициенты аппроксимации для уравнений

n	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4
1	1	-	-	-	-
2	1/2	1/2	-	-	-
3	5/12	8/12	-1/12	-	-
4	9/24	19/24	-5/24	1/24	-
5	251/720	646/720	-264/720	106/720	-19/720

При указанном подходе к построению уравнений и их решению основная часть погрешности моделирования возникает из-за некорректно заданных параметров схемы замещения. Поэтому повышение точности моделирования сводится к точному вычислению и корректному заданию параметров в системе уравнений (3.1), (3.3). Остановимся на этом вопросе подробнее. В первую очередь необходимо точно определять кривую намагничивания $\Psi_m(I_m)$, следует отметить, что ряд авторов [131, 132, 156, 201, 276, 282] предлагают использовать для этого обобщенные кривые намагничивания, аргументируя возможность обобщения характеристик применением метода подобия при разработке

электродвигателей, однако это не так. На рис. 3.3, рис. 3.4 приведены зависимости потокосцепления от относительного значения тока намагничивания, рассчитанные для типичных электродвигателей серии АИР, 5А(М).

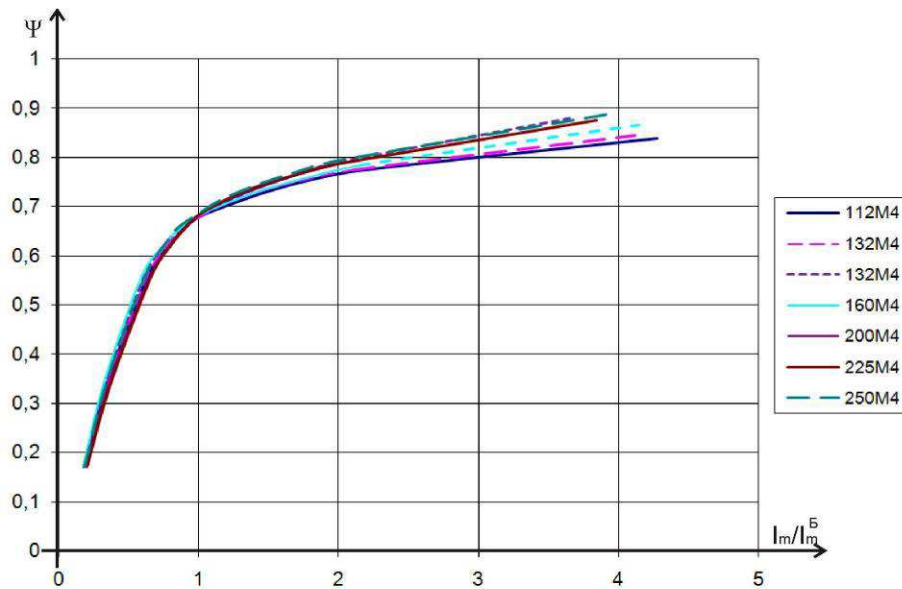


Рис. 3.3. Кривые намагничивания электродвигателей с ВОВ 112-250мм, $2p=4$

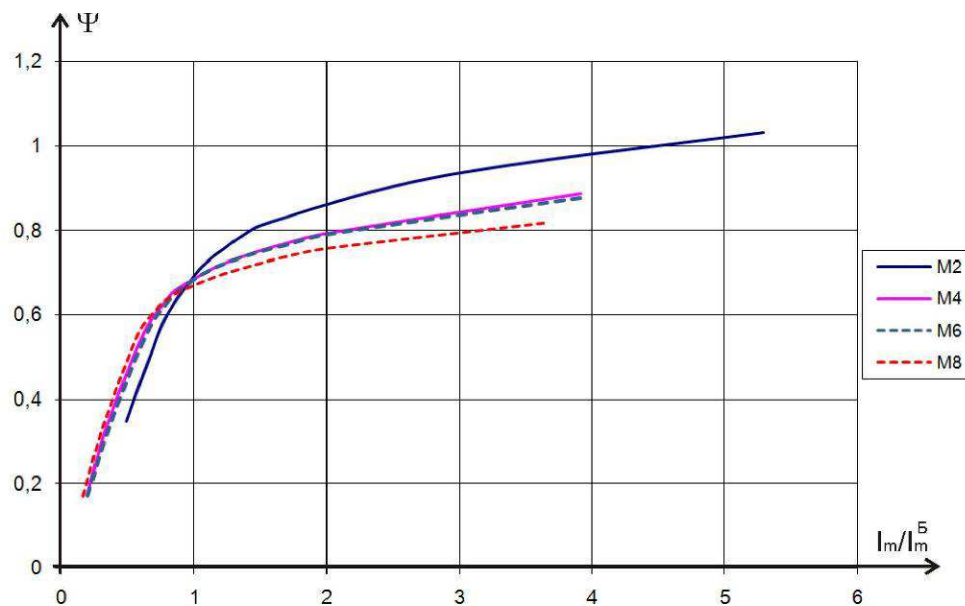


Рис. 3.4. Кривые намагничивания электродвигателей серии 5АМ с ВОВ 250мм, $2p=2,4,6,8$

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3.3-3.4, позволяет утверждать, что для насыщенной магнитной системы кривые намагничивания для разных машин отличаются. Это объясняется тем, что насыщение зубцов и ярма у электродвигателей различно. Поэтому для получения точных результатов моделирования необходимо отказаться как от линейного, так и от

обобщенного представления главной индуктивности.

Для представления нелинейных характеристик: потокосцепления главного поля от тока намагничивания $\psi(I_m)$; индуктивности рассеяния ротора от амплитуды и частоты тока ротора $L_{2\sigma}(I_2, f_2)$; сопротивления обмотки ротора от частоты тока ротора $R_2(f_2)$, была использована аппроксимация на основе B -формы кубического интерполяционного сплайна, реализованного в пакете *Spline Toolbox* для *MATLAB*.

На основании представленной модели (3.1) - (3.7) и системы уравнений (3.10) - (3.14) была разработана прикладная программа для компьютерного моделирования электромеханических характеристик асинхронных электродвигателей *AED_TA*. Характеристики программы представлены в главе 8.

Пример имитационного моделирования прямого пуска без нагрузки двигателя 5A225M4, полученный на основе модели с учетом насыщения магнитной системы и вытеснения тока в обмотке ротора в разработанной программе, приведен на рис. 3.5.

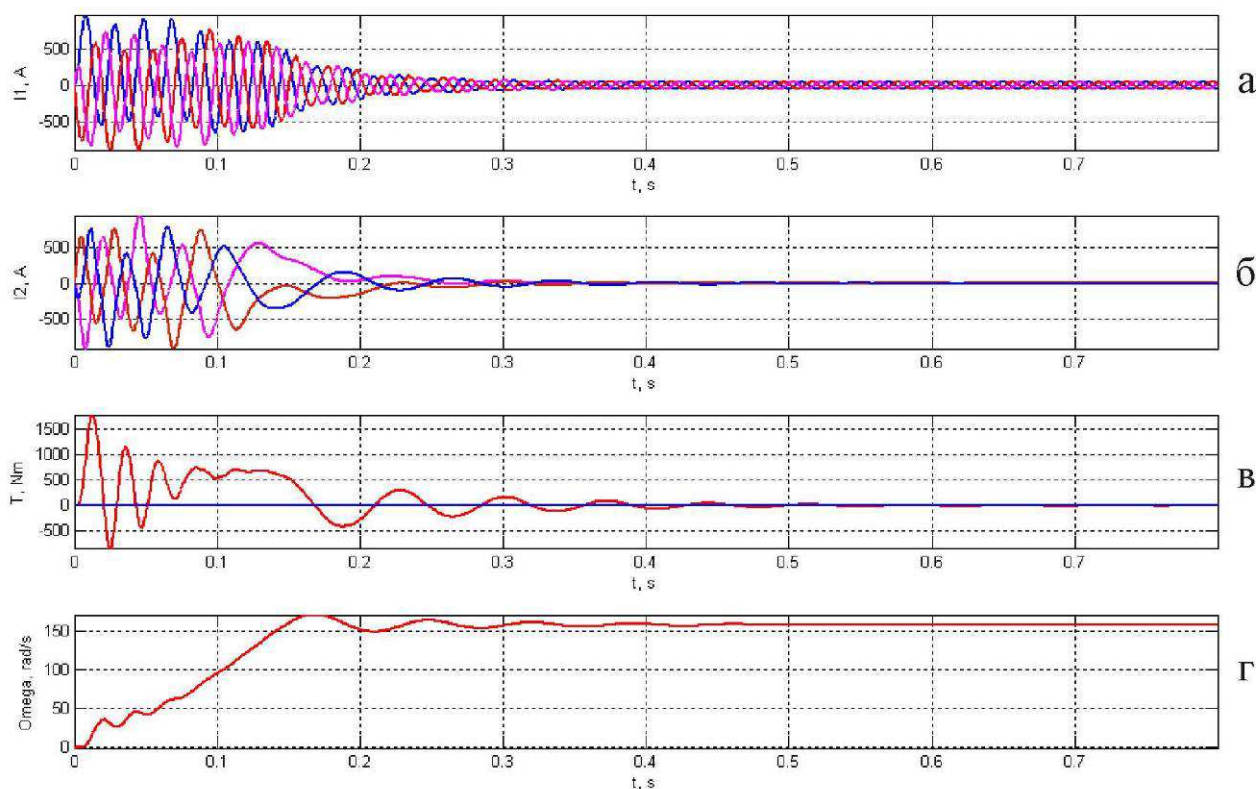


Рис. 3.5. Временные диаграммы прямого пуска АЭД типа 5A225M4:

а – фазные токи статора; б – фазные токи ротора;
в – момент электродвигателя; г – угловая частота вращения ротора

Пример моделирования векторного управления, полученный для того же двигателя, приведен на рис. 3.6. В качестве модели векторного регулятора в примере использовано *Direct rotor field orientation (DRFO)* управление. Из диаграммы на рис. 3.6. исключен процесс намагничивания (0-0.1с) – на котором происходит увеличение магнитного потока машины до его номинального значения.

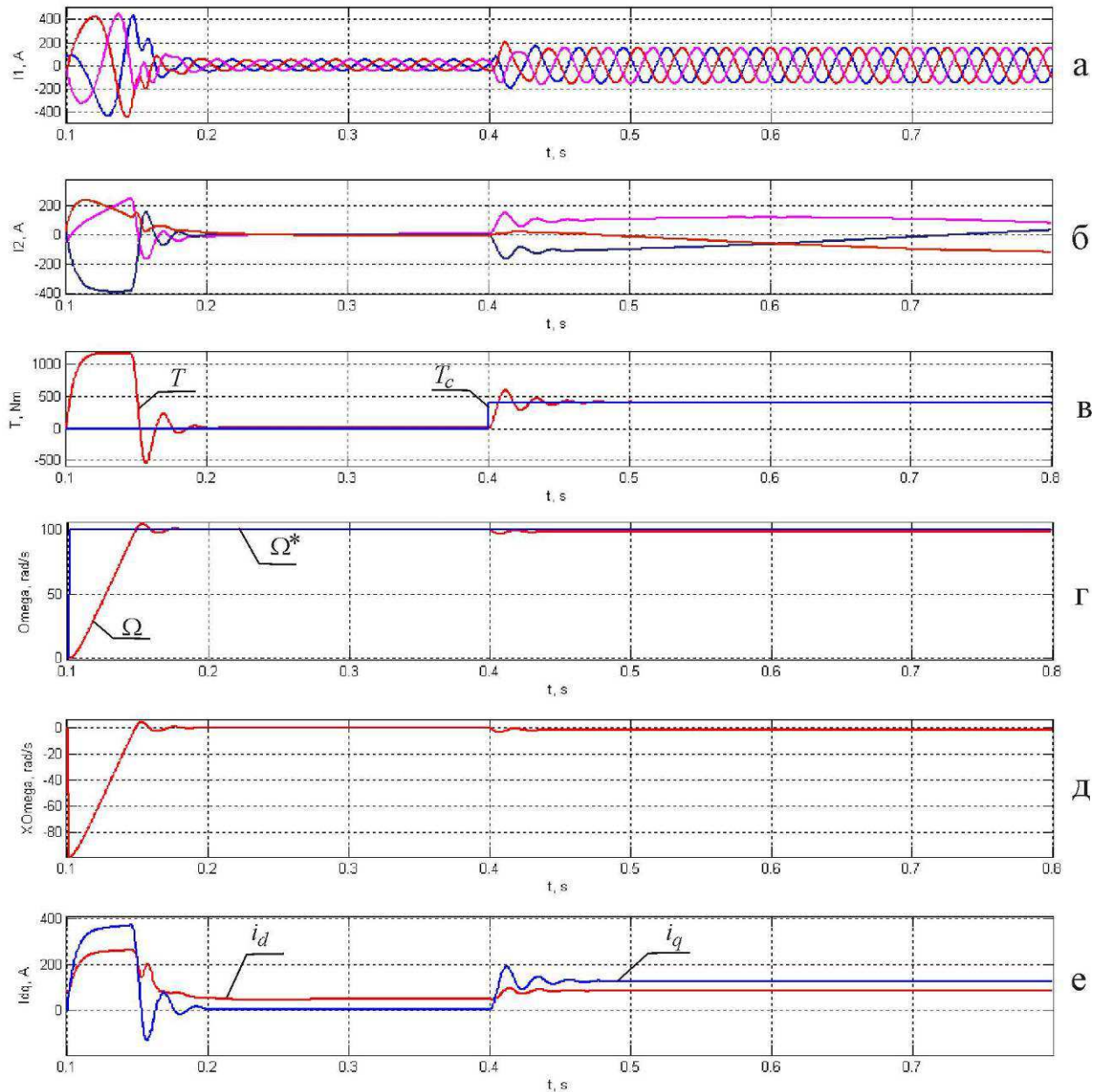


Рис. 3.6. Временные диаграммы АЭД типа 5А225М4 при векторном управлении частотой вращения:

а – фазные токи статора; б – фазные токи ротора; в – электромагнитный и сторонний момент; г – заданная и фактическая угловая частота вращения; д – ошибка по частоте вращения; е – d и q составляющие тока статора, рассчитанные во вращающейся системе координат

Математическая модель асинхронной машины, представленная уравнениями (3.1) - (3.7) и реализованная с помощью системы (3.10) - (3.14), была

дополнена уравнениями моделей силовых и управляющих компонентов мехатронных систем, представленными на основе метода пространства состояний, подробные характеристики которых представлены в таблице 8.1.

Верификация результатов моделирования и оценка их точности предполагает проведение серий испытаний электродвигателей. При этом затруднительными являются все виды подлежащих фиксации величин: ток в функции времени; момент в функции времени; напряжение в функции времени.

Учитывая сложность и высокую стоимость такого эксперимента, было принято решение о возможности подменить непосредственные испытания на сравнение интегрированных величин, полученных в результате динамического моделирования, с соответствующими величинами методики поверочного электромагнитного расчета согласно [158], результаты которой будем считать эталонными. Для сравнения результатов программы динамического моделирования с аналогичными программами, в частности пакетом динамического моделирования *MATLAB Simulink*, приведем соответствующие результаты моделирования, полученные в *Simulink*®.

Как указывалось ранее, влияние на точность результатов моделирования оказывают параметры схемы замещения, значение каждого из которых изменяется в зависимости от мощности в 100 и более раз. Поэтому верификация будет проведена на машинах 5A80MA4 1,1кВт и 5A225M4 55кВт 5A315MA8 110кВт, отношение мощностей которых составляет 1, 50 и 100 соответственно. Параметры исследуемых машин для линейной магнитной системы сведены в таблицу 3.3. Результаты сравнение приведены в таблицах 3.4 - 3.6.

Таблица 3.3. Параметры электродвигателей для верификации

№ п/п	p	J , кгм ²	R_1 , Ом	$L_{1\sigma}$, Гн	R_2 , Ом	$L_{2\sigma}$, Гн	L_m , Гн
5A80MA4 1,1 кВт	2	0,004	9,11	0,0158	5,7	0,0217	0,297
5A225M4 55кВт	2	0,5	0,0533	0,0006	0,00319	0,001	0,0219
5A315MA8 110кВт	4	6,03	0,0625	0,00123	0,0429	0,0017	0,031

Таблица 3.4. Результаты статических характеристик двигателя 5A80MA4

Программа	I_{1H} , А	I_{2H} , А	I_0 , А	Ω_H , рад/с	s_H	I_{1M} , А	I_{2M} , А	M_{DM} , Нм	M_{CM} , Нм	M_{CP} , Нм
ОСТ16	3,57	2,78	2,23	143	8,99	13,0	-	-	17,9	15,4
AED_TA (линейная)	3,52	2,87	2,43	146	6,96	12,7	11,1	31,0	20	16
AED_TA (нелинейная)	3,78	3,10	2,8	142	9,5	12,9	10,9	29	21	16
Simulink	3,51	2,80	2,34	143	8,99	14,1	11,3	31	*	*

В таблице: I_{1H} – номинальное действующее значение фазного тока статора; I_{2H} – номинальное действующее значение фазного тока ротора; I_0 – номинальное действующее значение тока холостого хода; Ω_H – номинальная частота вращения; s_H – номинальное скольжение; I_{1M} – максимальное действующее значение фазного тока статора при пуске; I_{2M} – максимальное действующее значение фазного тока ротора при пуске; M_{DM} – максимальное значение динамического момента; M_{CM} – максимальное значение статического момента; M_{CP} – значение статического пускового момента; * – значение примерно соответствует значению AED_TA(линейная).

Таблица 3.5. Результаты статических характеристик двигателя 5A225M4

Программа	I_{1H} , А	I_{2H} , А	I_0 , А	Ω_H , рад/с	s_H	I_{1M} , А	I_{2M} , А	M_{DM} , Нм	M_{CM} , Нм	M_{CP} , Нм
ОСТ16	102,0	89,7	31,1	154,7	1,4	597,8	-	-	907	783
AED_TA (линейная)	87,6	74,9	32	155	1,3	709	673	690	1080	113
AED_TA (нелинейная)	99,0	86	33	155	1,3	634	634	1780	950	756
Simulink	101	78	30	155	1,3	713	675	615	*	*

Таблица 3.6. Результаты статических характеристик двигателя 5A315MA8

Программа	I_{1H} , А	I_{2H} , А	I_0 , А	Ω_H , рад/с	s_H	I_{1M} , А	I_{2M} , А	M_{DM} , Нм	M_{CM} , Нм	M_{CP} , Нм
ОСТ16	209	179	68,5	77,6	1,2	1059	-	-	3250	2460
AED_TA (линейная)	197	173	68,3	77,8	0,9	1314	1240	2579	3900	400
AED_TA (нелинейная)	204	157	67,3	77,6	1,2	1207	1230	7240	3313	2200
Simulink	197	175	67,5	77,6	1,2	1238	1350	2300	*	*

Результаты, полученные в результате сравнения расчетных данных, показали значительное расхождение в пусковом моменте, а следовательно, и во времени пуска, присущее линейным моделям по сравнению с поверочным электромагнитным расчетом. Результаты, полученные на нелинейной моде-

ли, имеют меньшее расхождение с поверочным электромагнитным расчетом, следовательно, имеют большую достоверность.

Таким образом, результаты, полученные при выполнении представленного исследования, позволяют утверждать об адекватности модели реализованной в виде программного комплекса *AED_TA*.

Нелинейная модель, доступная в программе *AED_TA* и учитывающая насыщение магнитной системы и вытеснение тока в роторе, позволяет получать достоверные результаты с точки зрения сходимости результатов с поверочным электромагнитным расчетом.

В процессе опытной эксплуатации программы проводилось планомерное сопоставление результатов, получаемых с ее помощью, и данных, получаемых в методике поверочного расчета, при испытаниях машин. Усредненная по высотам погрешность составила для максимального пускового тока 10%, максимального момента 7%, пускового момента 13%, при использовании модели с линейными параметрами погрешность составила 16%, 14%, 58% соответственно. На рис. 3.7 представлены временные диаграммы запуска на холостом ходу электродвигателя 5AM250M8, полученные с помощью конечно-элементной модели в программе *ANSOFT Maxwell* (рис. 3.7а) и на основе предложенной модели в программе *AED_TA 2.0* (рис. 3.7б). Анализ диаграмм свидетельствует о хорошей сходимости результатов, но полевым расчет длится в 180 раз дольше. Аналогичные результаты были получены при моделировании двигателей серий 5A(M) и 7AVER с BOB 132-315, $2p=2-8$.

Опыт промышленной эксплуатации разработанной программы моделирования мехатронных систем с асинхронными двигателями на предприятиях концерна, начатый в 2006 году, показал, что наибольший интерес представляют следующие задачи энергетического анализа:

1. Уточненный расчет времени пуска и пусковых электромагнитных нагрузок, полученный на основе компьютерного моделирования.
2. Проверка и уточнение соответствия типа и мощности выбранных силовых компонентов системы (электродвигателя, преобразователя) заданному

закону управления и режимам ее эксплуатации.

3. Исследование электромагнитных характеристик и регулировочных свойств мехатронных систем в типовых и ненормальных режимах работы.

4. Исследование физических процессов в асинхронных машинах при аварийных режимах работы.

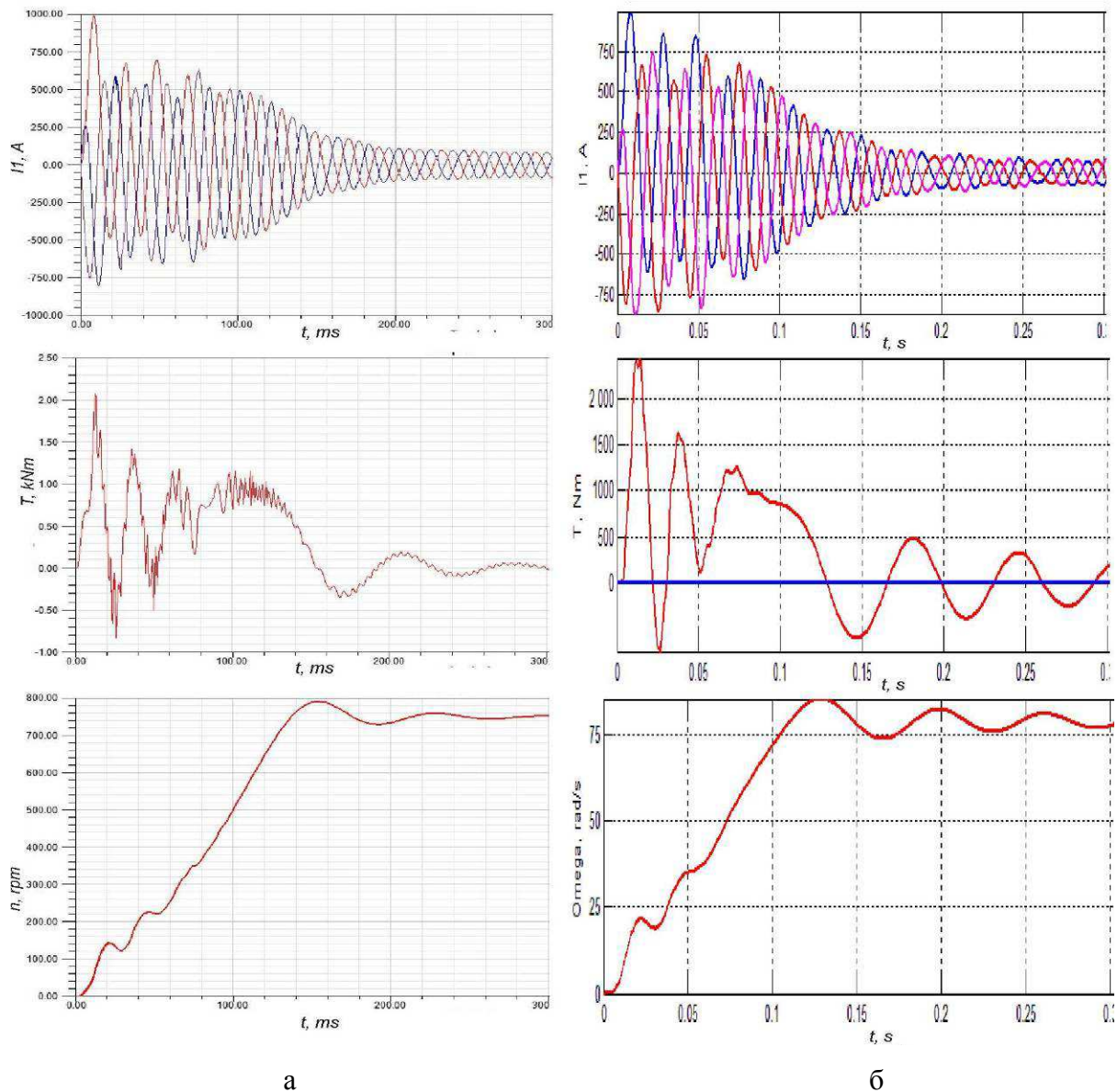


Рис. 3.7. Сравнительные временные диаграммы пуска на холостом ходу электродвигателя 5AM250M8 для соединения Y:

а) полученные на основе полевого моделирования (время расчета 6 часов);

б) полученные на основе предложенной модели (время расчета 2 минуты)

Таким образом, оказалось, что характер большинства исследуемых на практике задач не позволяет значительно упростить математическую модель, например, за счет перехода к двухфазной координатной системе. С другой

стороны, чрезмерное усложнение модели неизбежно связано с затруднением ее параметризации, что, в свою очередь, создает сложность для создания библиотек параметров и характеристик электродвигателей, которая приводит к бесполезности такого рода программных инструментов для инженеров-разработчиков мехатронных систем и приводов.

Программа использовалась специалистами расчетно-теоретического сектора при выполнении следующих научно-технических проектов:

1. «Создание методологии проектирования и разработка электромагнитного ядра асинхронных электродвигателей габаритов 112-315мм для частотно-регулируемого привода широкого применения».
2. «Разработка экспериментального образца комплекта тягового-силового электрооборудования машины гусеничной шифр «Викинг-2»;
3. «Создание безредукторных приводов для лифтов грузоподъемностью до 1000кг», госконтракт №8/З-686 Н-09;
4. Разработка высокоскоростного электродвигателя испытательного стенда для ЦАГИ АДВ215-100;
5. Создание нагнетателя с высокоскоростным электроприводом для наддува поршневых двигателей внутреннего сгорания.

3.3 Математические модели вентильно-индукторного двигателя

Известной отличительной особенностью вентильно-индукторных электродвигателей является то, что их функционирование возможно только под управлением регулятора, обеспечивающего коммутацию фазных токов в соответствии с сигналом датчика положения ротора. Вопросы исследования и моделирования индукторных машин получили хорошую проработку в работах отечественных и зарубежных авторов [42, 43, 63, 112, 170, 193, 264-266, 283, 287], однако эти исследования в основном были нацелены на управление, осуществляющее только включение и отключение тока в фазе и стабилизацию его амплитуды, вне зависимости от угловой координаты ротора. Поэтому имевшиеся математические модели не учитывают возможность регу-

лирования мгновенного значения тока фазы от угловой координаты ротора, которая может снизить величину пульсаций момента. Это означает необходимость разработки новой математической модели с учетом возможности регулирования мгновенного значения фазного тока [69, 136, 140, 142, 143, 147-149, 223, 247, 262, 288]. Такой тип управления далее будет называться термином «нелинейное токовое управление» по аналогии с *nonlinear current control*, введенным в известной работе [247]. На рис. 1.7 приведена схема управления током вентильно-индукторного двигателя, а на рис. 3.8 приведена электрическая схема замещения с m -фазной индукторной машины.

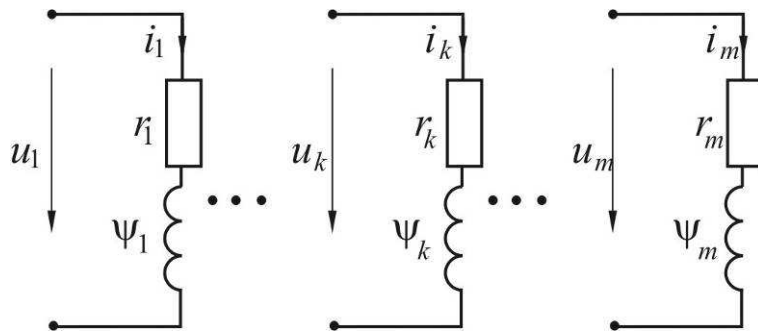


Рис. 3.8. Схема замещения m -фазного ВИД

Уравнения математической модели системы [77, 85, 106, 134, 135, 142] при нелинейном токовом управлении могут быть представлены в виде системы:

$$\begin{cases} \mathbf{U} = \mathbf{IR} + \frac{\partial \Psi}{\partial \mathbf{I}} \frac{d\mathbf{I}}{dt} + \frac{1}{z_R} \frac{\partial \Psi}{\partial \gamma} \Omega; \\ u_k = \begin{cases} E & i_{3k} < i_k + \delta i; \\ 0, & i_{3k} = 2\delta i; \\ -E, & i_{3k} > i_k + \delta i; \end{cases} \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_\Sigma - M_C - k_{тр}\Omega); \\ \frac{d\theta}{dt} = \Omega; \\ \gamma = z_R \theta, \end{cases} \quad (3.15)$$

где E – ЭДС источника питания, $\mathbf{U} = [u_1, \dots, u_m]$ – вектор напряжений, приложенных к m -фазной обмотке; R – активные сопротивления фазных обмоток; $\mathbf{I}_3 = [i_{31}, \dots, i_{3m}]$ – вектор заданных токов; $\mathbf{I} = [i_1, \dots, i_m]$ – вектор токов, проте-

кающих в m -фазах; $\Psi = [\psi_1, \dots, \psi_m]$ – потокосцепления m -фазной обмотки; γ – угловая электрическая координата; θ – угловая механическая координата; z_R – число зубцов ротора.

Электромагнитный момент, и момент генерируемый k -ой фазой $M(i_k, \gamma_k)$, вычисляются на основе энергетического метода [92, 126, 127, 135, 262, 280, 286]:

$$M_\Sigma = \sum_{k=1}^m M(i_k, \gamma_k); M(i_k, \gamma_k) = \frac{1}{z_R} \frac{\partial}{\partial \gamma} \int_0^{i_k} \Psi_k(i_k, \gamma_k) di_k, \quad (3.16)$$

или с помощью интегрирования тензоров натяжения Максвелла [92, 286]:

$$M(i_k, \gamma_k) = \oint_S B_\theta B_r dS,$$

где B_r – радиальная составляющая индукции; B_θ – тангенциальная (азимутальная) составляющая индукции; S – площадь, охватывающая ротор. Координата k -ой фазы определяется по формуле:

$$\gamma_k = \gamma_1 - \frac{2\pi}{m}(k-1).$$

Таким образом, для учета современных тенденций управления фазным током ВИД в общеизвестную модель, предложенную Т. Миллером [278], необходимо внести следующие дополнения:

- входной сигнал задается как функция тока от угловой координаты;
- для получения гладких решений используется алгоритм, основанный на выборе нужного значения решения из диапазона решений, получаемых при максимальном положительном и максимальном отрицательном значениях напряжения, приложенного к фазной обмотке (см. блок-схему на рис. 4.8).

Одними из перспективных направлений вентильно-индукторных электродвигателей являются двухфазные [134, 139, 141, 146, 161, 163-168, 221, 222, 262, 285, 286], имеющие выраженную несимметрию по угловой координате, для учета которой необходимо использовать характеристики $\psi(I, \gamma)$ и $M(I, \gamma)$ с полным периодом изменения потокосцепления. Поэтому следует увеличить область определения функции потокосцепления от угловой координаты до полного периода – 360 электрических градусов.

На рис. 3.9 представлен вид нелинейных характеристик одной фазы четырехфазного вентильно-индукторного двигателя с внешним диаметром сердечника статора $Da1=131\text{мм}$, разработанного группой: А.В. Захаров, В.А. Шабает (ПАО «НИПТИЭМ») и А.И. Елкин, А.В. Жданов, В.В. Морозов (ВлГУ) и изготовленного во Владимирском государственном университете для мехатронной системы поступательного перемещения.

Характеристики $\psi(I, \gamma)$ и $M(I, \gamma)$ могут быть найдены на основе моделей, основанных на использовании схем замещения магнитной цепи или на основе моделирования магнитного поля с помощью метода конечных элементов. Для аппроксимации указанных нелинейных характеристик следует использовать В-форму кубического сплайна, реализованного в *Spline Toolbox* для *MATLAB*.

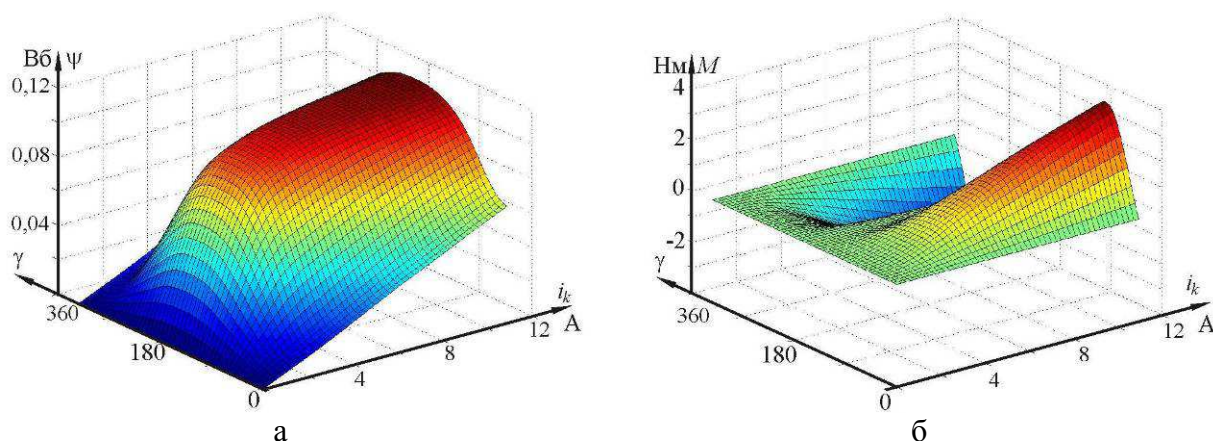


Рис. 3.9. Потокосцепление (а) и момент (б) фазы ВИД

Получение относительно точного и устойчивого решения в системе уравнений с нелинейными параметрами возможно при использовании многошагового метода Адамса-Маултона для интегрирования уравнений (3.15), (3.16). При этом необходимо представить уравнения модели в виде системы конечно-разностных уравнений:

$$\begin{cases} \Psi^j = \Psi^j + hU^j - hR \sum_{n=0}^q k_n I^{j-n}; \\ \Omega^j = \Omega^{j-1} + \frac{h}{J} \sum_{n=0}^q k_n T^{j-n} - \frac{h}{J} T_C^j; \\ \theta^j = \theta^{j-1} + h \sum_{n=0}^q k_n \Omega^{j-n}; \\ \gamma^j = z_R \theta^j, \end{cases} \quad (3.17)$$

Решение конечно-разностной модели (3.17) необходимо искать методом Ньютона-Рафсона:

$$\mathbf{x}_v = \mathbf{x}_{v-1} - (\mathbf{F}_{v-1})^{-1} \mathbf{F}(\mathbf{x}_{v-1}),$$

где $\mathbf{x} = [\mathbf{I} \quad \boldsymbol{\Omega} \quad \boldsymbol{\theta}]^T$ – вектор решения. Технология нахождения величины невязки, якобиана, вектора решения аналогична технологии, используемой при нахождении решения для асинхронного электродвигателя. Коэффициенты в уравнении (3.17) соответствуют значениям, приведенным в таблице 3.2. Опыт показал целесообразность использования четвертого порядка интерполяции.

Результаты моделирования переходных процессов в мехатронной системе с четырехфазным вентильно-индукторным двигателем [79, 136] при пуске и реверсе показаны на рис. 3.10, 3.11 и 3.12, 3.13 соответственно. При моделировании используется нелинейное токовое управление, формирующее специальную зависимость фазного тока от угловой координаты, такого, что обеспечивается минимизация неравномерности суммарного выходного момента машины.

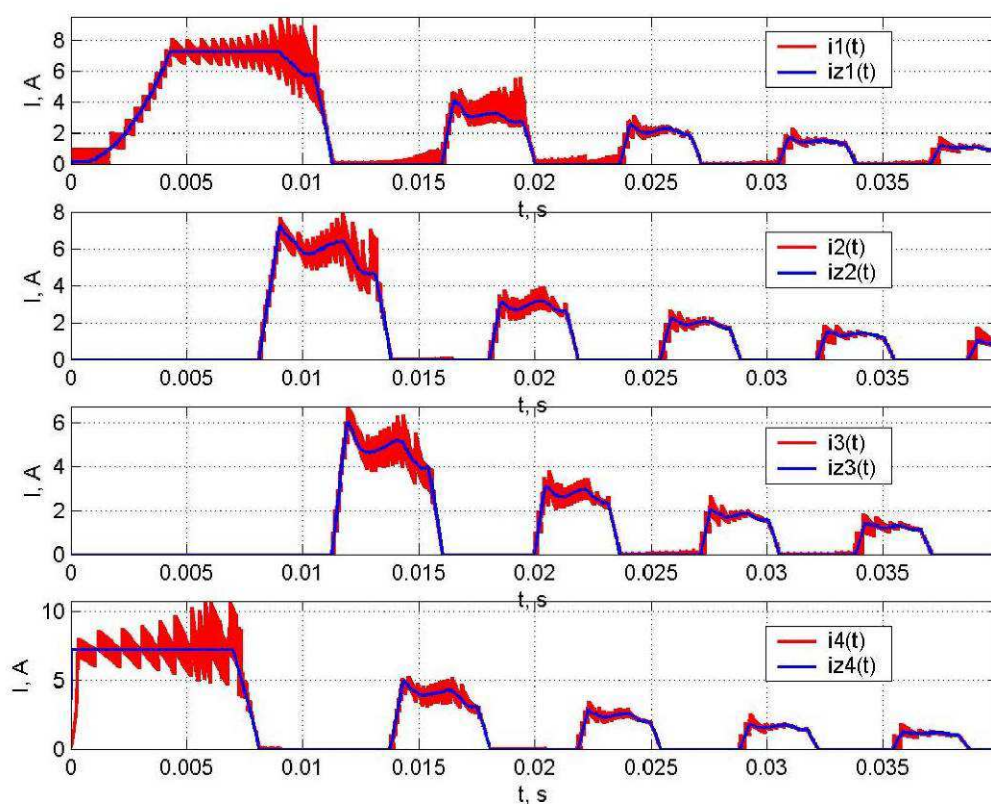


Рис. 3.10. Временные диаграммы фазных токов ВИД:
 $i_k(t), A$ – значение фазного тока, A ; $i_{zk}(t), A$ – заданное значение фазного тока, A ;
 t, s – время, s

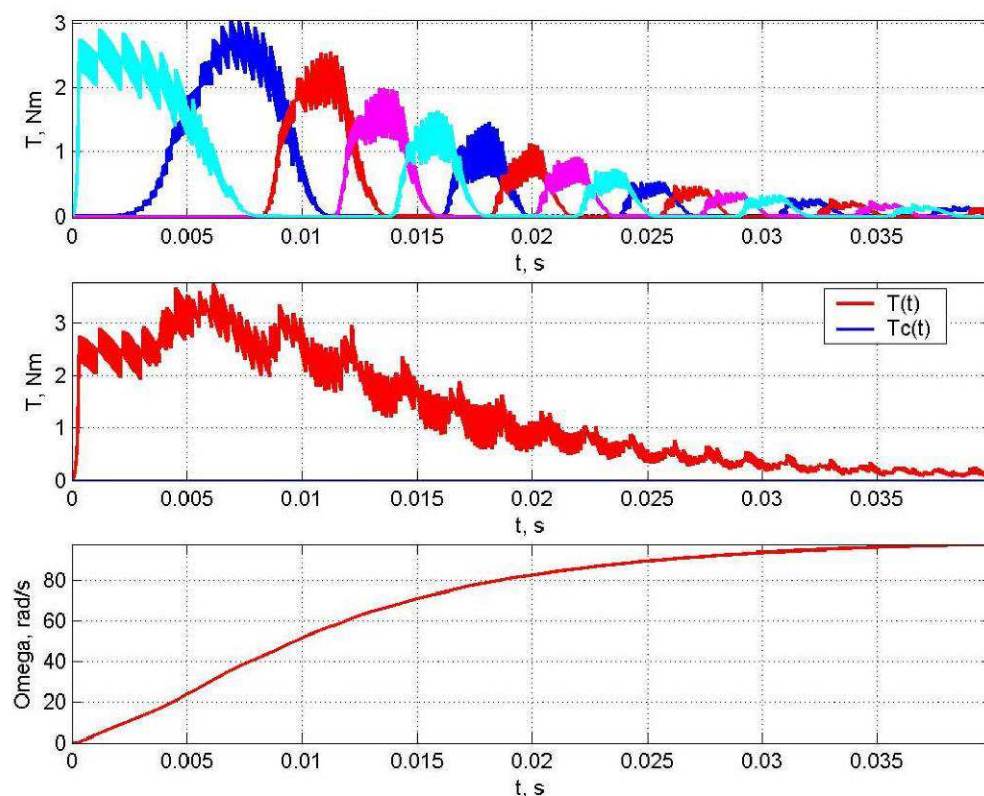


Рис. 3.11. Временные диаграммы момента и скорости ВИД:
 T, Nm – электромагнитный момент, Нм; T_c, Nm – момент нагрузки, Нм;
 $\Omega, rad/s$ – угловая частота вращения ротора, рад/с

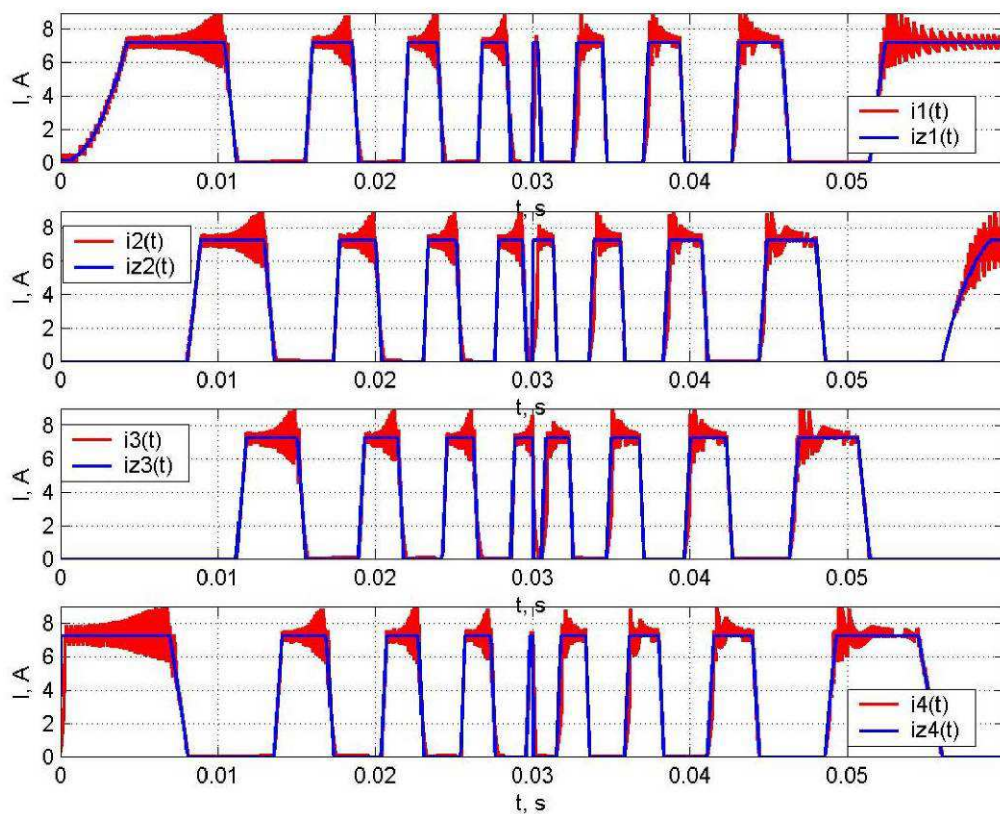


Рис. 3.12. Временные диаграммы фазных токов ВИД
при реверсировании

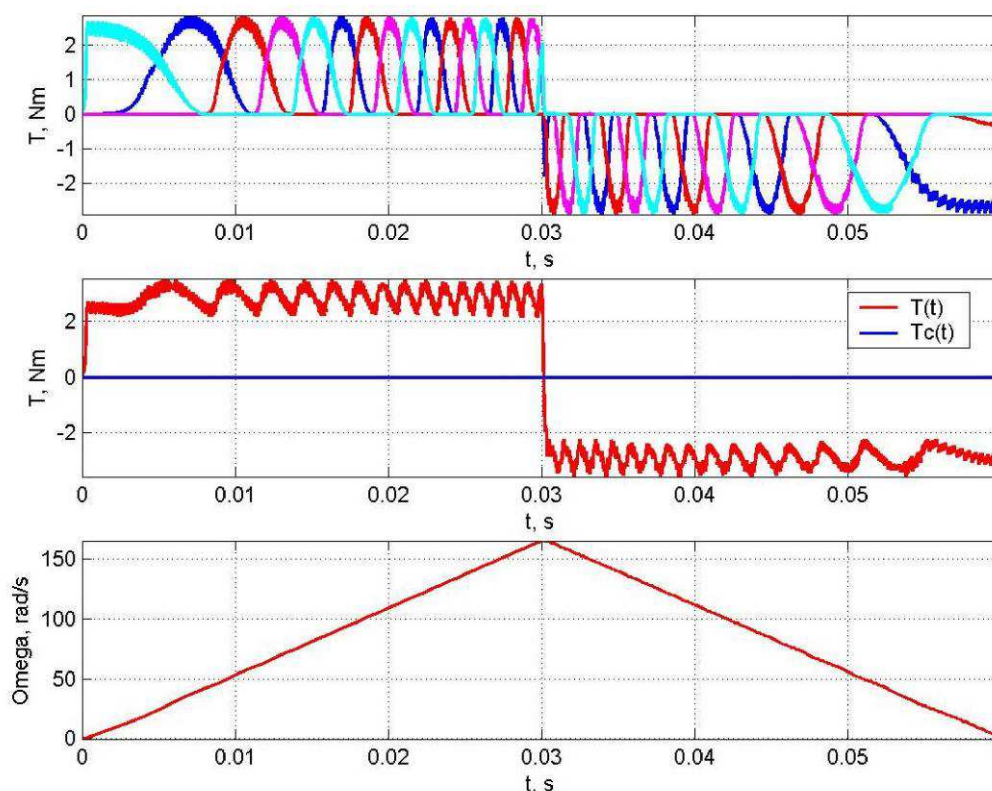


Рис. 3.13. Временные диаграммы момента и скорости ВИД при реверсировании

Следует отметить, что в случае моделирования процессов в вентильно-индукторном двигателе важным аспектом является моделирование установившегося процесса. Это объясняется сложным негармоническим характером изменения во времени основных электромагнитных и электромеханических характеристик. Поэтому для их анализа необходимо использовать графики и угловые зависимости, вычисленные и построенные для суммарного и фазного момента, тока. Кроме того, необходимо оценивать влияние алгоритмов управления током и углами коммутации на энергетические и регулировочные характеристики, а также важный для вентильно-индукторного привода показатель – неравномерность момента. Следует отметить, что получение данных характеристик из решения полной системы уравнений затруднительно, поэтому для их нахождения необходимо из системы (3.15) исключить последние три уравнения.

Пример моделирования электромеханических характеристик на основе показанной технологии приведен на рис. 3.14.

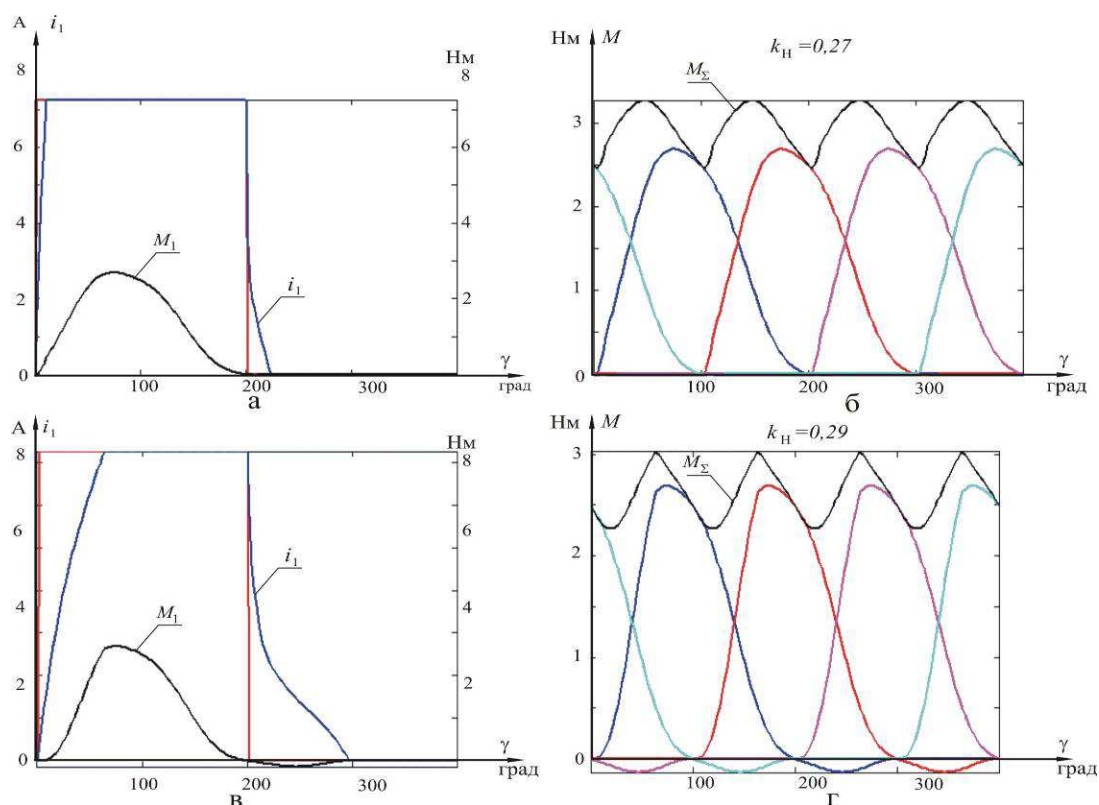


Рис. 3.14. Результаты моделирования ВИД при классическом управлении на двух частотах вращения:

а, в – ток и момент 1-ой фазы; б, г – момент 1,...,4 фаз и суммарный момент;
 γ – угловая электрическая координата

Анализ полученных результатов позволяет не только визуально оценивать процесс электромеханического преобразования на цикле коммутации фазы, но и оценивать соотношения суммарных и фазных характеристик токов, момента.

Верификация результатов моделирования с экспериментальными значениями была проведена в ходе совместного проекта ПАО «НИПТИЭМ» и ООО «Центртехкомплект» г. Москва, при поддержке кафедры электропривода МЭИ(ТУ), в результате которого были разработаны, изготовлены, испытаны и поставлены в эксплуатацию электродвигатели опытной партии 120 шт. на насосы подкачки горячей воды ЖКХ г. Москва. Параметры двигателей, разработанных в ходе проекта, приведены в Таблице 8.4. При этом были получены хорошие результаты сходимости расчетов с экспериментом. Максимальное расхождение аналитической и экспериментальной зависимостей момента от угловой координаты не превышало 10%, погрешность расче-

та минимальной индуктивности составила менее 5%, максимальной индуктивности менее 10%, погрешность вычисления КПД составила менее 5%, а амплитуды тока менее 7%.

Предложенные математические модели ВИД и других компонентов мехатронной системы были реализованы в программе имитационного моделирования *SRD_TA*, основные характеристики которой приведены в главе 8.

3.4 Математические модели тепловых процессов в силовых компонентах мехатронной системы

Важным этапом энергетических расчетов является задача определения тепловой нагрузки электродвигателя, в характерных режимах. Следует отметить, что наибольшее применение в практике электромашиностроения получили тепловые модели на основе тепловых схем замещения [7, 21, 172, 196, 215, 231], например РД.16.310-86 [188], которые хорошо отражают установившиеся значения температур в основных элементах электрической машины в закрытой оребренной обдуваемой оболочке. Однако в ряде задач, таких как моделирование переходных режимов, расчет нагрузочных скоростных характеристик, данные модели, включающие от 17 до 19 тел, оказываются чрезвычайно сложными как для получения на их основе динамических моделей, так и для расчета нагрузочных характеристик, что объясняется необходимостью точного вычисления масс и теплоемкостей для всех тел модели. Кроме этого, сложность представляет вентиляционный расчет электрической машины при разных частотах вращения, который следует представить с помощью несложных аналитических зависимостей. Для решения таких задач целесообразно разработать упрощенную модель, обеспечивающую необходимую точность. Опыт разработки электродвигателей, полученный при использовании моделей различной степени сложности, а также обобщения результатов экспериментов, показал, что необходимая точность для тепловой модели составляет 5°C для моделирования продолжительного режима и 10°C для моделирования кратковременных и повторно-кратковременных режимов. Для адекватного представления теплового ре-

жима в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором необходимо три тела – обмотка статора, ротор, сердечник статора. Так как, во-первых, данные тела имеют критическое значение в надежности электродвигателя, а во-вторых, могут быть верифицированы на основе стандартных тепловых испытаний электрических машин [44], согласно ГОСТ7217-87 «Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний» [50].

Предлагаемая в работе тепловая модель имеет три тела и может быть представлена схемой замещения, показанной на рис. 3.15., и системой уравнений:

$$\begin{cases} p_{CU1} = c_{CU1}m_{CU1}\frac{d\Theta_{CU1}}{dt} + \frac{1}{R1}(\Theta_{CU1} - \Theta_{FE}) + \frac{1}{R1+R2}(\Theta_{CU1} - \Theta_{CU2}); \\ p_{CU2} = c_{CU2}m_{CU2}\frac{d\Theta_{CU2}}{dt} + \frac{1}{R1+R2}(\Theta_{CU2} - \Theta_{CU1}) + \frac{1}{R2}(\Theta_{CU2} - \Theta_{FE}); \\ p_{FE} = c_{FE}m_{FE}\frac{d\Theta_{FE}}{dt} + \frac{1}{\beta R3}(\Theta_{FE} - \Theta_{CE}) + \frac{1}{R1}(\Theta_{FE} - \Theta_{CU1}) - \frac{1}{R2}(\Theta_{FE} - \Theta_{CU2}), \end{cases} \quad (3.18)$$

где p_{CU1} – мощность потерь в обмотке статора; p_{CU2} – мощность потерь в обмотке и магнитопроводе ротора; p_{FE} – мощность потерь в сердечнике статора; c_{CU1} , c_{CU2} , c_{FE} , – усредненная удельная теплоемкость обмотки статора, ротора, сердечника статора и станины соответственно; m_{CU1} , m_{CU2} , m_{FE} , – масса обмотки статора, ротора и сердечника статора и станины соответственно; Θ_{CU1} , Θ_{CU2} , Θ_{FE} , Θ_{CE} – превышение температуры обмотки статора, ротора, сердечника и станины, окружающей среды, соответственно.

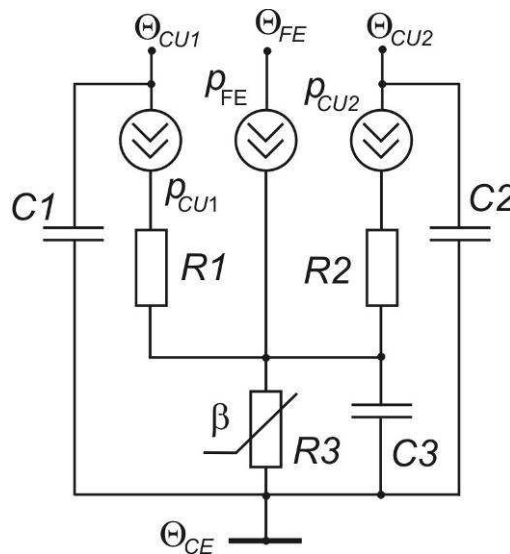


Рис. 3.15. Упрощенная схема замещения тепловой математической модели

На рис. 3.15 $R1$, $R2$, $R3$ – эквивалентное тепловое сопротивление между обмоткой статора и станиной, ротором и станиной, станиной и окружающим воздухом соответственно; $C1$, $C2$, $C3$, – эквивалентная теплоемкость обмотки статора, ротора, сердечника статора и станины соответственно; β – коэффициент изменения вентиляции, зависящий от частоты вращения ротора.

К известному затруднению при использовании многомассовых тепловых моделей относится их сложная параметризация [89], погрешности которой приводят к ошибкам в расчетах. В рамках исследования разработана методика параметризации тепловой модели, основные формулы которой приведены в главе 4. На рис. 3.16 приведены результаты моделирования нагрева и остывания асинхронного электродвигателя 5A200M6, полученные с помощью предлагаемой математической модели. Кривая остывания была проверена экспериментально, погрешность составила 5°C , что оказалось лучше, чем предполагалось.

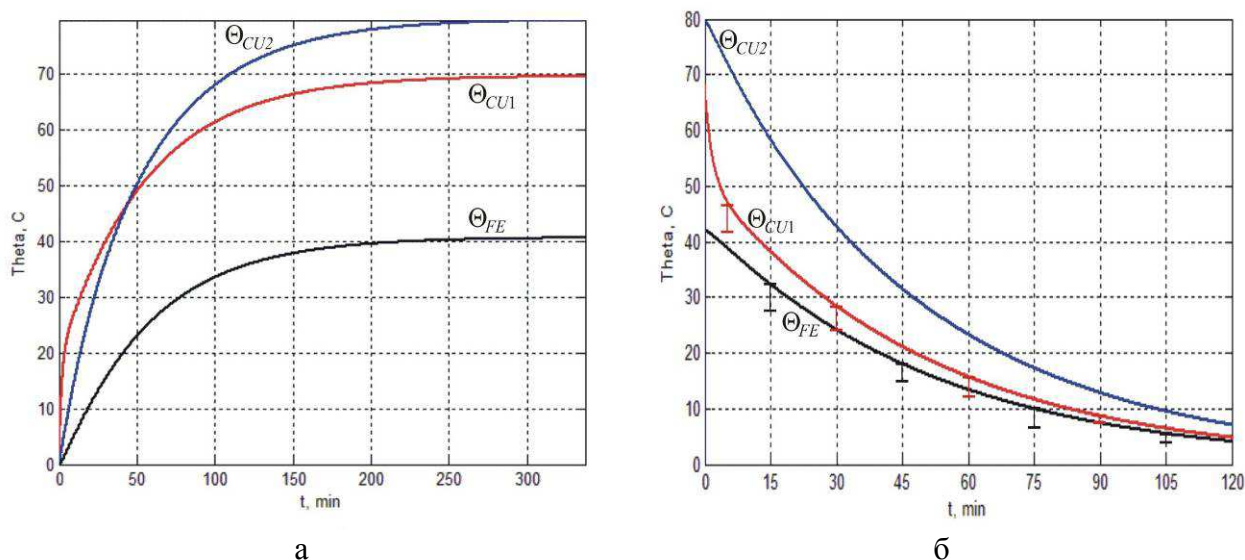


Рис. 3.16. Результаты моделирования нагрева (а) и остывания (б) электродвигателя 5A200M6

Верификация результатов моделирования и эксперимента была проведена более чем на 10 электродвигателях от 132 до 280 габаритов, погрешность моделирования нигде не превысила 8°C . Следует отметить, что для верификации использовалась только кривая остывания, так как ее экспериментальное определение существенно проще и корректнее, чем измерение кривой нагрева.

Важной составляющей моделирования неустановившихся тепловых режимов является проблема определения мгновенной мощности потерь в основных элементах машины. Совместное решение систем уравнений (3.1) и (3.18) или (3.15) и (3.18) нецелесообразно, так как постоянные времени тепловых процессов многократно превосходят постоянные времени электромагнитных процессов. Входные данные тепловой модели могут быть получены следующим способом. На основе имитационного моделирования и поверочного расчета, проведенных для основных режимов, следует найти интегральную величину мощности потерь в элементе или их временную зависимость для исследуемого режима. Особенное внимание следует уделить расчету магнитных потерь, при расчете которых следует учитывать следующие факторы.

1. Задача имитационного моделирования магнитных потерь, несмотря на успех ряда ученых [126, 127, 169, 262, 278, 286], не может считаться решенной, так как отсутствует достоверное экспериментальное подтверждение, кроме того, расчет и моделирование магнитных потерь даже для установившихся режимов электродвигателей имеет много феменологических аспектов [236-238], основанных на эксперименте. Поэтому при расчете магнитных потерь необходимо использовать методику поверочного электромагнитного расчета.

2. Благодаря значительным величинам постоянных времени уравнений тепловой модели возможно пренебречь влиянием временного распределения потерь за цикл преобразования, заменив их средней величиной, которая может быть представлена как функция от частоты и потока $p_{FE}(f, \Psi)$, для асинхронного электродвигателя, и функция от частоты вращения и угла коммутации тока при заданном уровне и форме тока $p_{FE}(n, \gamma_c) \big|_{I_3(\gamma)}$, для вентильно-индукторного двигателя [138].

На рис.3.17а приведена диаграмма нагрева и остывания, рассчитанных для электродвигателя АИР180М2 при его работе в кратковременном режиме S2, 90мин при $P_2=1,1P_{2н}$. При моделировании учитывалось изменение охлаждения в паузе, которое обусловлено отсутствием вентиляции. Рис.3.17б показы-

вает аналогичный процесс для режима S2, 240мин с неventилируемой машиной, при $P_2=0,6P_{2H}$.

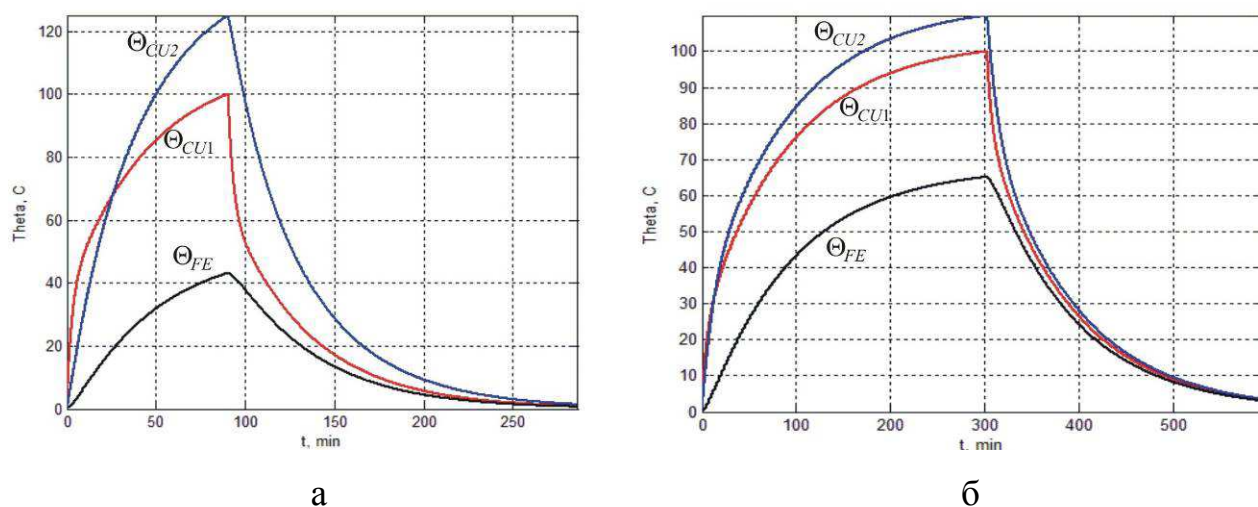


Рис. 3.17. Результаты моделирования теплового режима электродвигателя АИР180М2 в кратковременном режиме:

а – при самовентиляции IC411; б – при естественном охлаждении IC410

Существенным преимуществом предложенной модели перед распространенными упрощенными моделями, имеющими одно тело, является отражение ими процесса быстрого нагрева и остывания, характерное для обмотки статора. Указанный адиабатический процесс хорошо известен электромеханикам и характеризуется скоростью нагрева и скоростью остывания обмотки статора.

Выводы по главе 3

1. Для выполнения энергетического анализа предложена уточненная математическая модель асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, ориентированная на расчет процессов в мехатронных системах, построенная на основе метода теории цепей в естественных фазных координатах и учитывающая нелинейные характеристики магнитной цепи, в части главного поля, поля рассеяния ротора, а также эффект вытеснения тока в обмотке. Использование такого подхода позволяет снизить погрешность при определении максимального пускового тока до 10%, максимального момента до 7%, пускового момента до 13%, которые при использовании моделей с линейными параметрами составляют 16%, 14%, 58% соответственно. Представление уравнений модели двигателя на

основе метода пространства состояний позволило произвести логичное объединение математических моделей всех компонентов мехатронной системы.

2. Разработанная на основе предложенной математической модели асинхронного электродвигателя прикладная программа, включающая библиотеки нелинейных параметров более чем для 100 типоразмеров машин производства ООО «ПК «ВЭМЗ», ПАО «НИПТИЭМ», ООО «Русэлпром-СЭЗ», а также базу алгоритмов управления частотой вращения и моментом, библиотеку типовых нагрузок, позволила существенно снизить временные затраты и ошибки, связанные с некорректным заданием параметров модели, при проведении энергетического расчета.

3. Для энергетических расчетов мехатронных систем с вентильно-индукторными двигателями предложена модель m -фазной индукторной машины, отличающаяся от известных полнопериодным представлением нелинейной зависимости потокосцепления, на основе аппроксимации сплайном третьего порядка. Это позволяет расширить область решения задачи математического моделирования на двухфазные вентильно-индукторные двигатели с несимметричной конструкцией магнитопровода. При этом получены хорошие результаты сходимости расчетов с экспериментом. Амплитуда погрешности зависимости момента от угловой координаты составила менее 10%, погрешность расчета минимальной индуктивности оказалась менее 5%, а максимальной индуктивности менее 10%, неточность в определении КПД не превысила 5%, а амплитуды тока 7%.

4. Для анализа неустановившихся тепловых процессов в мехатронных системах с электродвигателями закрытого исполнения разработана упрощенная трехмассовая математическая модель, использование которой существенно снизило временные затраты на параметризацию модели в сравнении с 17- 19-и тельными моделями, но при этом позволило учитывать процессы быстрого нагрева, недоступные для одномассовых моделей. Погрешность моделирования температуры в основных элементах электродвигателя при использовании такой модели не превышает 10°C.

ГЛАВА 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ ПО СКОРОСТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Расчет и выбор регулируемого электродвигателя в задаче разработки мехатронной системы занимает центральное место. Его качество определяет соответствие получаемых электромеханических характеристик желаемым, а также надежность, стоимость, массу и габариты всей системы.

Традиционно проектирование электродвигателей включает в себя электромагнитный, тепловентиляционный, механический, виброакустический и экономический расчеты. Векторные и скалярные типы управления частотой вращения, моментом, током влияют на электромеханические и тепловые характеристики двигателей переменного тока, что должно быть учтено в проектных и проверочных методиках расчета. Данная глава посвящена разработке методик электромагнитного и теплового расчетов асинхронных и вентильно-индукторных двигателей, работающих в составе мехатронных систем и учитывающих влияние регуляторов.

4.1 Скоростные характеристики электродвигателей мехатронных систем

Электродвигатели переменного тока, разработанные для применения в нерегулируемом электроприводе и используемые в большинстве приложений регулируемого электропривода, характеризуются номинальным режимом работы, при котором мощность, момент, частота вращения, ток, КПД и другие показатели условно постоянны, оптимальны и регламентируются ГОСТ, ТУ и паспортом изделия. Изменения указанных характеристик при смене амплитуды и частоты напряжения питания, нагрузки не приводятся в документах производителя, поэтому не могут быть учтены как при проектировании, так и при эксплуатации. Это затрудняет выбор и использование электродвигателей в регулируемом электроприводе и делает задачу оптимального выбора электромеханического преобразователя для мехатронных систем практически неразрешимой.

Среди многочисленных электромеханических параметров, которые могут быть выбраны в качестве аргумента, для построения энергетических характеристик наиболее приемлемым является частота вращения. С точки зрения анализа зависимостей электромеханических показателей от частоты вращения широкое применение нашли следующие:

1. Механическая (нагрузочная) характеристика $M(n)$, при номинальной нагрузке, обеспечивающая номинальный тепловой режим электрической машины.
2. Зависимость максимального момента от частоты вращения (перегрузочная характеристика) $M_M(n)$, при установленных ограничениях на ток и напряжение – перегрузочная характеристика.
3. Зависимость тока от частоты вращения $I(n)$, при заданном потоке и номинальном тепловом режиме.
4. Зависимость КПД и коэффициента мощности от частоты вращения при заданной нагрузке на валу.
5. Для вентильно-индукторных двигателей важной является зависимость неравномерности момента от частоты вращения, получаемая при заданном типе и параметрах управления током фазы и нагрузке на валу.

Использование обозначенных характеристик, как показал производственный опыт, в значительной мере облегчает как процесс разработки нового двигателя для мехатронной системы, так и подбор уже существующей машины. В ряде случаев допустимо и оправдано заменять частоту вращения частотой питания.

Пояснить использование скоростных характеристик можно на следующем примере. Как правило, технические требования, передаваемые заказчиком, содержат данные только о типе механизма, требованиям по габаритным, присоединительным и другим конструктивным параметрам, а также диапазоне регулирования, желаемых параметрах на одной, двух, трех частотах вращения, в том числе на номинальной частоте. При этом особые точки скоростных характеристик – максимумы и минимумы, на нагрузочной, перегрузочной и токовой характеристиках могут быть обойдены вниманием составителя технических требований. Поэтому проектировщик обязан в техниче-

ском задании привести и согласовать скоростные нагрузочные, перегрузочные, токовые и другие необходимые скоростные характеристики, представленные в графическом или численном виде с необходимой дискретностью, исключающей выпадение особых точек из рассмотрения. Это первое.

Второе. На рис. 4.1 приведены примеры соотношения нагрузочных и перегрузочных характеристик приводов различного назначения совместно с соответствующими скоростными характеристиками частотно-регулируемого асинхронного двигателя. Анализ взаимного соотношения требуемых и получаемых скоростных характеристик, в первую очередь, нагрузочной и перегрузочной, который получается при наложении заданных и фактических зависимостей, позволяет определить направление тактики модификации машины:

- уменьшение габарита в случае значительного запаса по значению требуемого и имеющегося номинальных моментов в первой зоне регулирования;

- коррекция обмоточных данных или параметров питания в случае несоответствия конца первой зоны, которая, как правило, соответствует номинальной точке механической характеристики заданному значению;

- модификация пазовой геометрии ротора и статора для изменения значения максимального момента при минимальной частоте вращения на перегрузочной характеристике в первой зоне регулирования;

- изменение пазовых геометрий ротора и статора для обеспечения требуемого максимального момента перегрузочной характеристики и протяженности второй зоны регулирования нагрузочной характеристики.

Таким образом, для того чтобы разработчик имел возможность использовать классические рычаги влияния на важнейшие характеристики машины (электромеханические и энергетические характеристики): главные размеры, пазово-зубцовую геометрию, обмоточные данные, ему необходимо иметь инструмент, иллюстрирующий последствия его действий на скоростных или частотных характеристиках. В последующих параграфах настоящей главы приведены методики и алгоритмы, необходимые для создания такого инструмента.

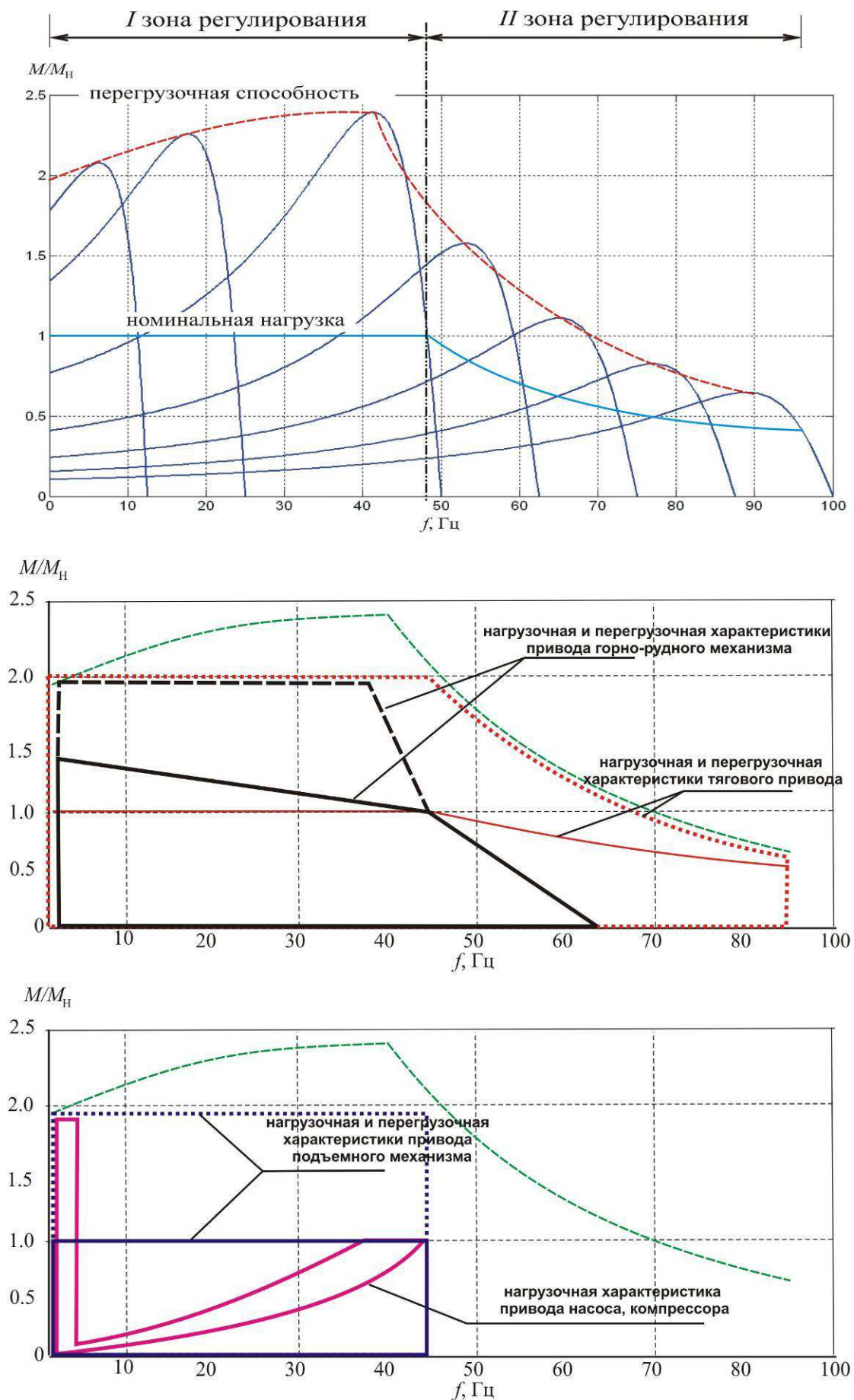


Рис. 4.1. Примеры типовых соотношений механических характеристик

4.2 Расчет скоростных характеристик регулируемого асинхронного электродвигателя

Методика поверочного электромагнитного расчета асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором по ОСТ.16-0.801.302-85 [158], разработанная группой под началом Т.Г. Сорокера и усовершенствованная в работах ВНИИЭМ, ВНИПТИЭМ (НИПТИЭМ), с точки зрения отражения процессов электромеханического преобразования энергии, обеспечивает уникальную точность в совокупности с возможностью учета большинства технологических особенностей производства. Это подтверждается опытом ее использования на протяжении более 50 лет, в течении которых были разработаны и внедрены в массовое производство электродвигатели серий 4А, АИР, 5А, 5АМ, 7АВЕ [7, 8, 107, 210, 215]. Точность данной математической модели многократно исследовалась и обсуждалась в соответствующих работах [70, 109], поэтому, на основе ее формул и уравнений необходимо разработать новую методику, учитывающую влияние основных регуляторов мехатронной системы и приемлемую для построения скоростных характеристик.

Однако построение алгоритма расчета в данной методике ориентировано на моделирование электромеханических характеристик при питании непосредственно от сети переменного тока, что вносит значительные затруднения при разработке регулируемых электродвигателей, так как не учитывает алгоритмы управления магнитным потоком и частотой вращения. Таким образом, проектирование электрической машины приходится проводить итерационным путем, подбирая входное напряжение, частоту, мощность таким образом, чтобы учесть алгоритмы управления, например, стабилизацию магнитного потока, регулирование частоты вращения и другие факторы.

Алгоритмы управления асинхронными электродвигателями разнообразны, их количество растет с каждым годом, однако любой современный метод управления такими машинами направлен на отдельное или зависимое управление тремя электромеханическими характеристиками: частотой вращения, магнитным потоком, моментом. В связи с этим, необходимо изменить методику

поверочного электромагнитного расчета таким образом, чтобы эти управляемые величины были входными, а параметры, которые ранее являлись входными электромеханическими параметрами: мощность, напряжение, частота питания – оказались выходными. При этом способ задания параметров радиальной и аксиальной геометрии машины, расчет основных геометрических свойств активной части и методику расчета магнитной цепи (МЦ) изменять не нужно. На рис. 4.2 приведена схема алгоритма новой методики, на которой выделен участок классического поверочного расчета по ГОСТ.16-0.801.302-85.

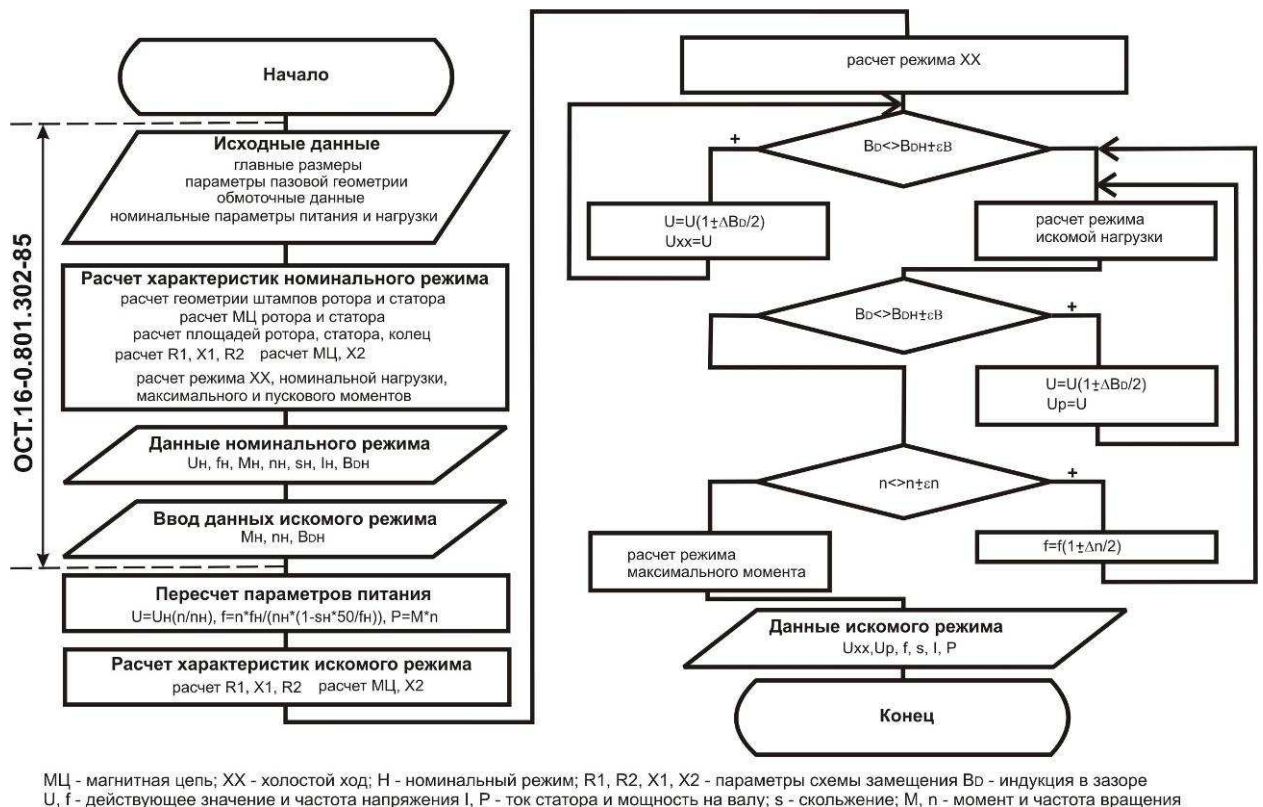


Рис. 4.2. Схема расчета электромеханических характеристик регулируемого АЭД с учетом алгоритмов управления

Таким образом, входными данными методики являются: частота вращения, момент нагрузки, магнитная индукция в воздушном зазоре, максимальное действующее значение фазного напряжения и тока. Новыми выходными данными становятся: частота питания, действующие значения напряжения в режимах холостого хода U_{XX} , номинальной нагрузки U_p , максимальной нагрузки. Таким образом, алгоритм реализует решение обратной задачи относительно классического электромагнитного расчета и расширяет подхо-

ды декларативного программирования, применяемые к проектированию электродвигателей [99]. Это означает, что в результатах задается спецификация решения.

Результаты моделирования характеристик в диапазоне регулирования частоты вращения, для общепромышленного двигателя 5A225M4 (55кВт, 1500 об/мин) производства ООО «ПК«ВЭМЗ» приведены на рис. 4.3.

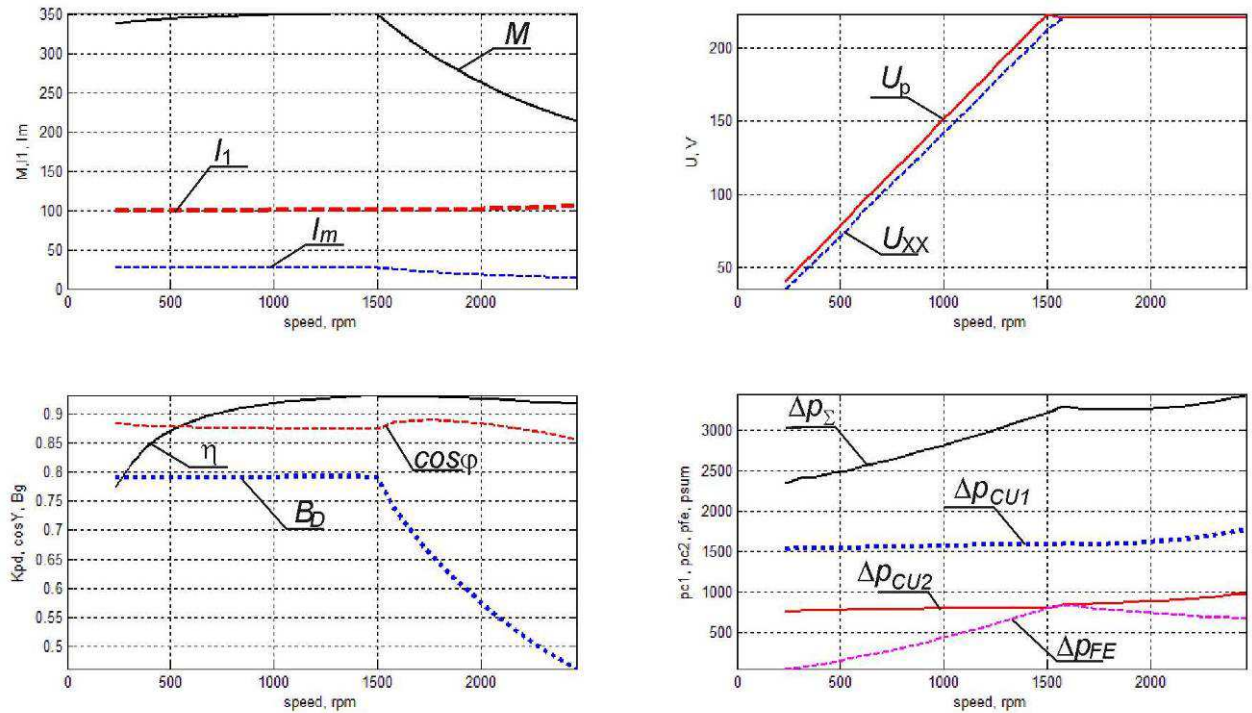


Рис. 4.3. Характеристики мехатронной системы с АЭД в диапазоне регулирования частоты вращения

В приведенной блок-схеме функции регулятора магнитного потока показаны блоком $B_D \leftrightarrow B_{DH} \pm \varepsilon B$, который соответствует стабилизации основного потока машины B_D или потокосцепления главного поля Ψ_m . Известно, что разработчики электропривода используют и другие параметры для стабилизации, например, потокосцепление ротора $\dot{\Psi}_2 = \dot{\Psi}_m + \dot{I}_2 L_{2\sigma}$, или потокосцепление статора $\dot{\Psi}_1 = \dot{\Psi}_m + \dot{I}_1 L_{1\sigma}$ [12, 34, 62, 94, 95, 177, 195, 201, 240, 241, 245, 255, 268, 271]. Нахождение величин потокосцеплений при проведении поверочного расчета нецелесообразно. Поэтому необходимо представить функции потокосцеплений ротора и статора через традиционные для электромеханики величины.

Стабилизация величины потокосцепления ротора может быть представлена с помощью условия:

$$\sqrt{B_D^2 + \left(\frac{X_2 I_2}{E} B_D\right)^2} \Leftrightarrow \sqrt{B_{DH}^2 + \left(\frac{X_{2H} I_{2H}}{E_H} B_{DH}\right)^2} \pm \varepsilon_B,$$

где X_2 – индуктивное сопротивления рассеяния обмотки ротора, приведенное к статору; E – ЭДС; ε_B идентичен ε_B на блок-схеме и характеризует точность поддержания величины индукции, индекс «Н» – обозначает номинальный режим. Стабилизация величины потокосцепления статора может быть представлена с помощью выражения:

$$\sqrt{B_D^2 + \left(\frac{X_1 I_1}{E} B_D\right)^2} \Leftrightarrow \sqrt{B_{DH}^2 + \left(\frac{X_{1H} I_{1H}}{E_H} B_{DH}\right)^2} \pm \varepsilon_B,$$

где X_1 – индуктивное сопротивления рассеяния обмотки статора. Функцию регулятора скорости осуществляет блок $n \Leftrightarrow n_H \pm \varepsilon_n$, где ε_n соответствует ε_n блок-схемы и обозначает ошибку регулирования скорости.

Достижение необходимой точности по регулируемым величинам осуществляется методом дихотомии, для чего вычисляются полусуммы: $\Delta B_D / 2 = (B_{DH} - B_D) / 2$ по индукции и $\Delta n / 2 = (n_H - n) / 2$ и по частоте вращения.

Кроме представленных, могут быть реализованы и другие типы регуляторов потока, например, стабилизация ЭДС: $E \Leftrightarrow E_H \pm \varepsilon_E$. Алгоритм вычислений, представленный блок-схемой, позволяет получать скоростные характеристики для систем с различными способами управления потоком. Однако для этого необходимо предварительно для каждого алгоритма определить регулируемую (стабилизируемую) величину, эквивалентную B_D .

Представленная на рис. 4.2 блок-схема построена на основе расчетных формул и уравнений методики ОСТ.16-0.801.302-85 [158], а следовательно, сохраняет ту же точность и качественные свойства, что и исходная методика. Поэтому параметры активной части асинхронных электродвигателей, разработанных с использованием классических проектного и проверочного электромагнитного расчетов, могут быть перенесены в предложенную методику.

Визуализация результатов не только в виде данных отдельных точек, но и в виде графиков, как это показано на рис. 4.3, позволяет быстро оценить соответствие расчетных электромеханических характеристик требуемым с учетом особенностей управления. Кроме того, дает возможность определить скоростные зависимости вспомогательных параметров, например, величину форсирования напряжения, изменение мощности потерь в элементах машины от частоты вращения. Для построения скоростных характеристик на основе разработанной методики необходимо организовать внешний цикл с последовательным дискретным увеличением значения частоты вращения n .

Использование скоростных характеристик позволяет качественно сравнивать заданные в технических требованиях и фактические – расчетные зависимости основных электромеханических характеристик от частоты вращения, получаемые при заданных параметрах активной части машины. Следовательно, осуществление направленной модификации параметров активной части асинхронных электродвигателей в направлении выполнения заданных технических требований с использованием предлагаемой процедуры расчета становится более наглядным и обоснованным. На рис. 4.4 приведено соотношение скоростных характеристик для общепромышленного двигателя серии 5АМ и специального частотно-регулируемого электродвигателя ТАД250М4, построенного на основе серии 7АВЕ. Обозначением $\Delta D_{\text{РЕГ}}$ на рисунке показано увеличение диапазона регулирования, полученное для частотно-регулируемой машины за счет использования специальной пазово-зубцовой геометрии ротора и статора. Обмоточные данные электродвигателя ТАД250М4 изменены относительно фактических параметров обмотки, исходя из пересчета на напряжение 220В, что сделано для более наглядного сравнения.

Одной из новых возможностей, появляющихся при использовании предлагаемой методики, является поиск оптимального режима питания асинхронного электродвигателя. Такой поиск может быть осуществлен, например, в рамках функционалов минимизирующих: суммарные потери F_1 , превышение температуры обмотки статора F_2 , превышение температуры обмот-

ки статора F_3 , характерные для разработчиков электродвигателей [75, 82]. Кроме них можно находить минимумы других целевых функций (подробно об этом написано в главе 5). В этом случае блок-схему по рис. 4.2 необходимо дополнить внешней процедурой поиска минимума функционала F_H , а также внешним циклом, реализующим соответствующий регулятор: $F <> F_H \pm \varepsilon F$. При этом, необходимо находить минимум F_H любым методом оптимизации, а в качестве аргумента функционала следует использовать величину магнитного потока $F(B_D)$.

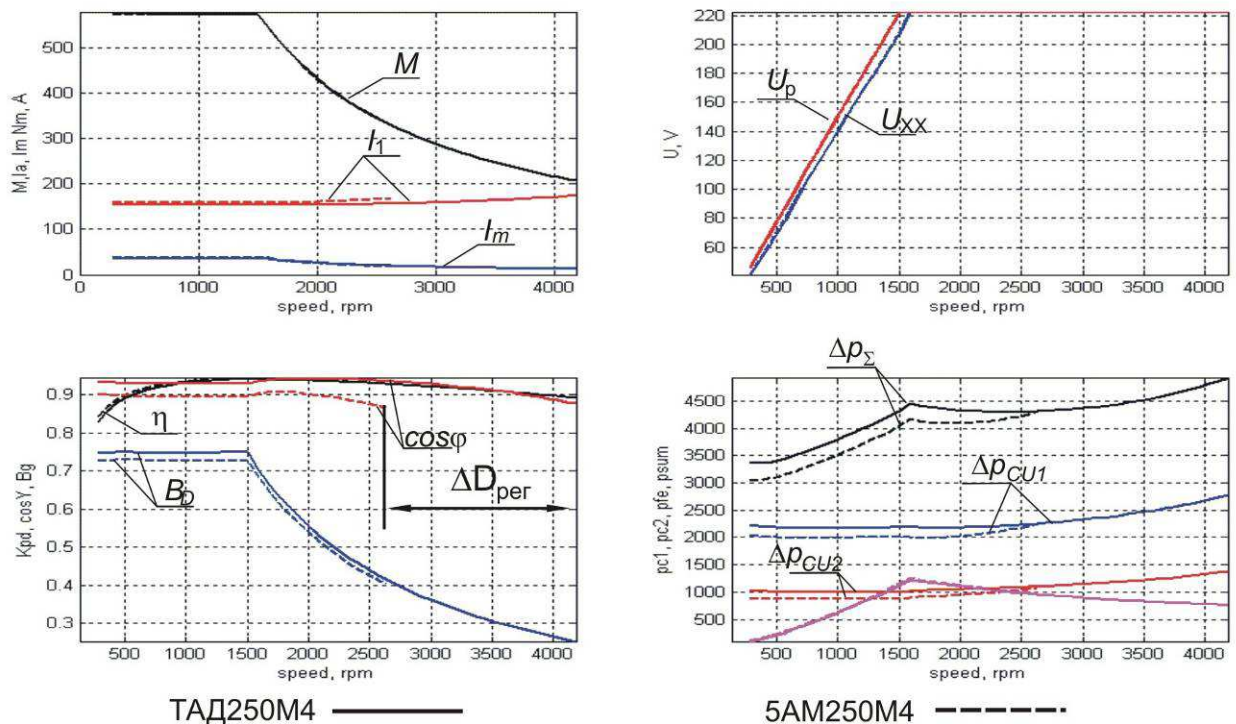


Рис. 4.4. Соотношения скоростных характеристик для двух АЭД: общепромышленного 5АМ250М4 и частотно-регулируемого ТАД250М4

Для оценки точности предлагаемой методики было проведено сопоставление результатов расчета и эксперимента. Эксперимент был проведен в лаборатории испытательного центра ПАО «НИПТИЭМ». Испытуемые электродвигатели управлялись преобразователем частоты компании VACON серии NXS с бездатчиковым векторным управлением, при этом проводились измерения действующих значений первых гармоник напряжения и тока, подводимых к электродвигателю. Электромагнитный момент и частота вращения измерялись непосредственно с помощью тензометрических муфт и датчиков частоты вра-

щения. В опытах использовалось сертифицированное оборудование. Результаты расчета и эксперимента сведены в таблицы 4.1-4.3.

Таблица 4.1. Расчетные и экспериментальные данные двигателя ВА250S2 при его питании от ПЧ с векторным управлением и частотой модуляции $f_{\text{ШИМ}}=3\text{кГц}$

	Параметр								$\Delta_{\text{МАХ}}, \%$
входные данные	n , об/мин	Эксп.	272	560	1160	1461	2061	2780	
		Расч.	271	562	1160	1462	2061	2781	
	M , Нм	Эксп.	154	211	228	233	238	242	
		Расч.	152	210	227	233	237	241	
выходные данные	f_1 , Гц	Эксп.	5	10	20	25	35	47	2,5
		Расч.	4,9	9,9	19,9	24,9	35,9	47,9	
	U_1 , В	Эксп.	39	77	153	191	268	359	2,6
		Расч.	39	79	153	192	268	359	
	I_1 , А	Эксп.	92	120	126	129	132	135	6,7
		Расч.	86	112	122	125	127	130	

Таблица 4.2. Расчетные и экспериментальные данные двигателя ВА280S2 при его питании от ПЧ с векторным управлением и частотой модуляции $f_{\text{ШИМ}}=3\text{кГц}$

	Параметр								$\Delta_{\text{МАХ}}, \%$
входные данные	n , об/мин	Эксп.	276	568	1167	1468	2068	2785	
		Расч.	277	569	1168	1468	2067	2784	
	M , Нм	Эксп.	223	297	321	328	336	342	
		Расч.	222	296	321	327	336	342	
выходные данные	f_1 , Гц	Эксп.	5	10	20	25	35	47	2
		Расч.	4,9	9,9	19,9	24,9	34,9	46,9	
	U_1 , В	Эксп.	39	78	154	193	270	363	3
		Расч.	40	80	158	196	272	363	
	I_1 , А	Эксп.	130	165	174	177	181	185	2,3
		Расч.	127	165	171	174	180	184	

Таблица 4.3. Расчетные и экспериментальные данные двигателя АДЧР112М4 при его питании от ПЧ с векторным управлением и частотой модуляции $f_{\text{ШИМ}}=2\text{кГц}$

	Параметр						$\Delta_{\text{МАХ}}, \%$
входные данные	n , об/мин	Эксп.	220	524	679	1284	
		Расч.	219	523	678	1283	
	M , Нм	Эксп.	41,2	40,3	40,0	37,5	
		Расч.	41,1	40,1	40,0	37,4	
выходные данные	f_1 , Гц	Эксп.	10	20	25	45	7,5
		Расч.	9,3	19,3	24,6	45,6	
	U_1 , В	Эксп.	93	163	200	344	6,5
		Расч.	87	160	198	342	
	I_1 , А	Эксп.	12,5	12,3	12,3	11,6	3,5
		Расч.	12,8	12,2	12,1	11,2	

Сопоставление проводилось следующим образом: полученные экспериментальные данные сравнивались с аналогичными параметрами, полученными расчетом. Входными данными для расчета являлись: частота вращения, точность поддержания значения которой $\varepsilon_n = 1$ об/мин, и момент в нагрузке, точность поддержания $\varepsilon_M = 1$ Нм. Максимальное значение относительной погрешности расчетных данных относительно эксперимента Δ_{MAX} вычислялось для значения питающей частоты, первой гармонической составляющей действующих линейных значений напряжения и тока статора. Анализ соотношения результатов, приведенных в таблицах 4.1-4.3, показывает невысокие значения погрешности Δ_{MAX} , получаемые при расчете электромагнитных характеристик двигателя, а следовательно, рекомендуется для использования при энергетическом анализе мехатронных систем.

Разработанная методика поверочного расчета, основанная на использовании скоростных характеристик, была реализована в прикладной программе для ЭВМ и применена при разработке специалистами расчетно-теоретического сектора ПАО «НИПТИЭМ» ряда регулируемых асинхронных двигателей. Например, тяговых электродвигателей для комплектов электрооборудования городских гибридных автобусов длиной 12 и 17 метров, разработанных ОАО «Белкоммунмаш» г. Минск, гусеничного трактора 160 л.с. производства ПО «Минский тракторный завод» [251, 252], электродвигателей привода лифтовой лебедки серии КИАТ-ЛПП производства ПАО «НИПТИЭМ». Кроме того, при разработке модификации «с» частотно-регулируемых электродвигателей производства ООО «Русэлпром-Мехатроника», предназначенных для кранового, горного и испытательного оборудования, проводился расчет и анализ скоростных характеристик. В результате применения данного подхода удалось за короткое время разработать активные части электрических машин без дополнительных экспериментальных исследований. Это позволило не корректировать конструкторскую документацию на электродвигатели после проведения типовых испытаний.

4.3 Расчет скоростных характеристик регулируемого вентильно-индукторного электродвигателя

Как отмечалось в предыдущей главе, для расчета статических характеристик мехатронных систем с вентильно-индукторными двигателями целесообразно исключить из системы уравнений (3.15) последние три уравнения. В этом случае становится возможным расчет скоростных характеристик ВИД на основе расчетной схемы, представленной на рис. 4.5.

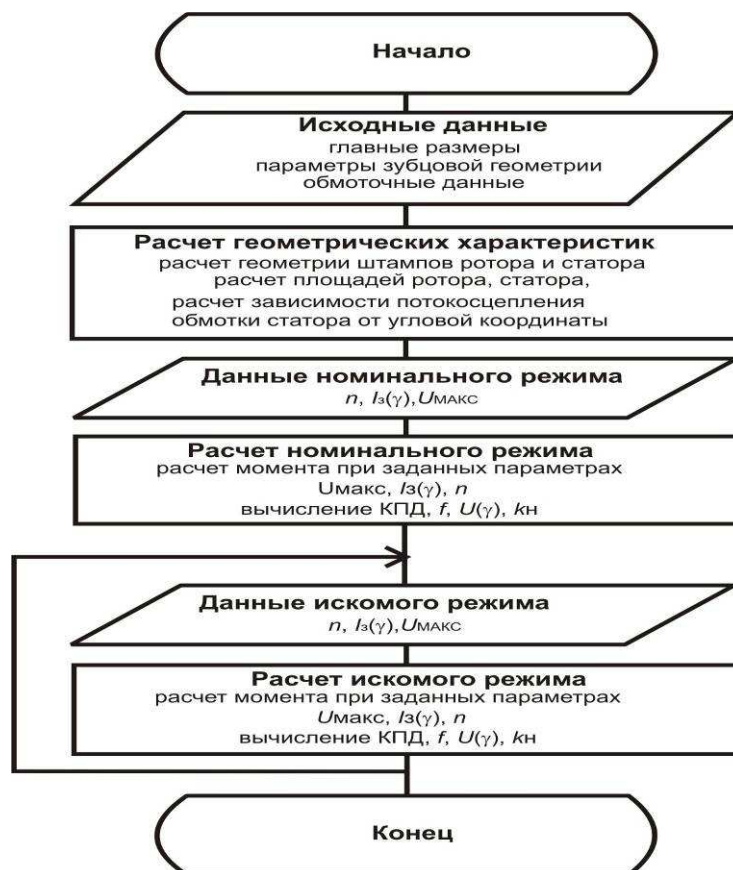


Рис. 4.5. Алгоритм расчета электромеханических характеристик вентильно-индукторного двигателя с учетом алгоритмов управления фазным током

Важной особенностью вентильно-индукторных двигателей при любом типе управления является неравномерность и знакопеременность момента одной фазы в течение такта преобразования [29, 37, 97, 124, 165-167, 244, 262, 273, 275]. Равномерность суммарного момента может достигаться с помощью специальных алгоритмов, управляющих фазными моментами, основанных на регулировании амплитуды фазных токов. Средний момент за такт преобразо-

вания зависит от способа управления и определяется с помощью выражения:

$$M_{\text{CP}} = \frac{1}{\gamma_T} \int_0^{\gamma_T} M_{\Sigma} d\gamma, \quad (4.1)$$

где γ_T – продолжительность такта ($\gamma_T = 360$ эл. град), M_{Σ} – суммарный момент вентильно-индукторного двигателя:

$$M_{\Sigma} = \sum_{k=1}^m M(i, \gamma_k).$$

Неравномерность момента может быть оценена с помощью коэффициента неравномерности [135, 140]:

$$k_H = \frac{\Delta M}{M_{\text{CP}}}, \quad (4.2)$$

где $\Delta M = M_{\text{МАКС}} - M_{\text{МИН}}$.

Актуальность минимизации неравномерности момента вентильно-индукторного электродвигателя объясняется в первую очередь ее влиянием на надежность и долговечность подшипниковых опор машины. Как показал опыт внедрения мехатронных систем с двухфазными ВИД на объекты ЖКХ г. Москвы, неравномерность электромагнитного момента, присущая данным двигателям в процессе работы, приводит к проскальзыванию внешней обоймы подшипника относительно ступицы, вследствие чего происходит быстрый износ посадки подшипника в ступице, а следовательно, и всей опоры. К сожалению, получить математические зависимости, характеризующие величину срока службы подшипника от неравномерности момента, не удалось, так как эта величина зависит от точности изготовления, материала ступицы и других физико-технических факторов. Однако было замечено, что увеличение неравномерности сокращает срок службы подшипника. Кроме того, на основании проведенных исследований и качественных представлений был разработан алгоритм ускоренных испытаний вентильно-индукторных электродвигателей, основанный на контролируемом увеличении пульсаций момента. Алгоритм был включен в типовые испытания, проводимые ПАО «НИПТИЭМ», а его использование позволяло выявить критические

технологические отклонения производства подшипниковых опор.

Анализ блок-схемы, приведенной на рис. 4.5, позволяет сделать вывод о том, что электрохимические характеристики вентильно-индукторного двигателя, в том числе скоростные, в значительной мере определяются зависимостью задания по току от угла $I_3(\gamma)$. В качестве примера на рис. 4.6 приведены результаты моделирования четырехфазного ВИД, конструкции 8×10 с внешним диаметром сердечника статора $Da1=131\text{мм}$, номинальным моментом 4,5 Нм и номинальной частотой вращения $n=1000$ об/мин, полученные при использовании двух простых зависимостей в качестве токового задания: одного полупериода функции синуса и трапеции.

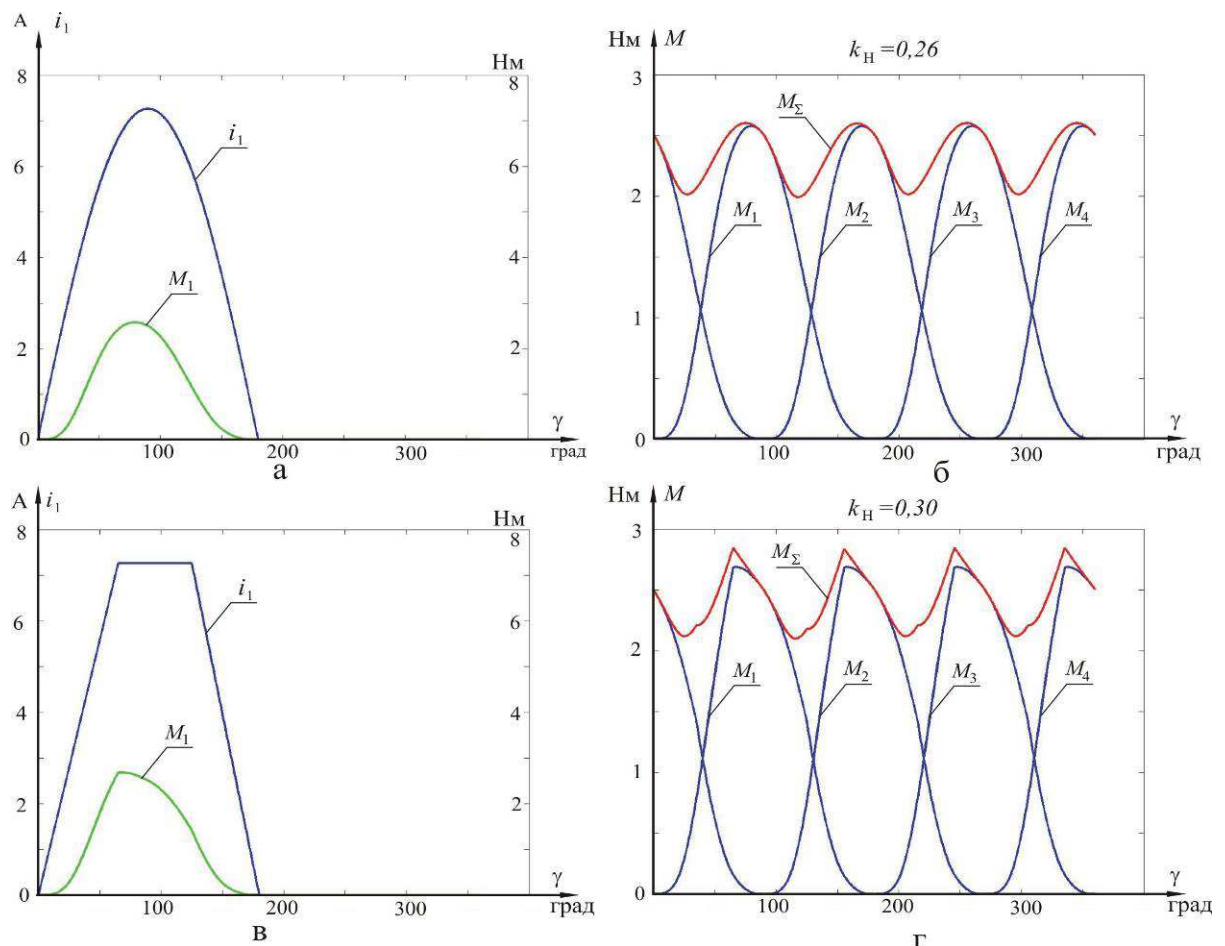


Рис. 4.6. Результаты моделирования ВИД при синусоидальной и трапецидальной формах фазного тока:

а, в – ток и момент 1-ой фазы; б, г – момент 1,...,4 фаз и суммарный момент

Скоростные характеристики мехатронной системы при трапецидальном задании тока, получаемые при различных углах сдвига тока относительно рас- согласованного положения зубцов ротора и статора, приведены на рис 4.7.

Влияние сдвига тока относительно рассогласованного положения зубцов неоднозначно и зависит от конструкции радиальной геометрии. Как правило, коэффициент полезного действия, момент, мощность при заданной амплитуде фазного тока увеличиваются при уменьшении этого угла, однако коэффициент неравномерности момента увеличивается. Скос зубцов ротора двигателя также влияет на вид скоростных характеристик, в частности, уменьшает величину неравномерности момента, делает ее менее зависимой от угла сдвига тока относительно рассогласованного положения зубцов.

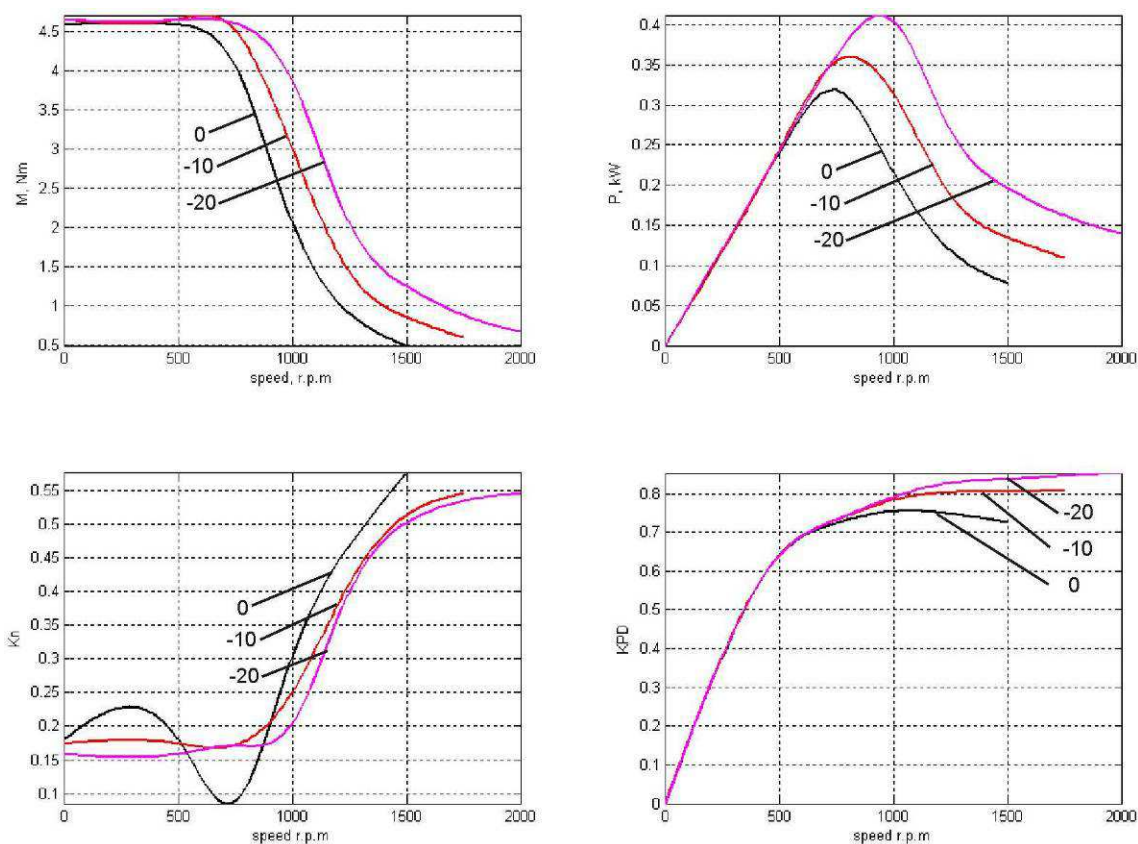


Рис. 4.7. Основные электромеханические скоростные характеристики мехатронной системы с ВИД

M, Nm – момент, Нм; K_n – коэффициент неравномерности момента;
 P, kW – мощность, кВт; KPD – КПД в о.е.; (0, -10, -20) – угловой сдвиг фазного тока

Широтно-импульсная модуляция, используемая в регуляторах тока современных преобразовательных устройств, вносит серьезные искажения в результаты расчета. Если в классических электродвигателях переменного тока влияние шума квантования и алгоритмов ШИМ может быть учтено простыми методами, шум квантования отброшен и учтен в потерях, алгоритм ШИМ учтен

за счет снижения действующего значения напряжения и введения дополнительных гармоник в состав напряжения, то в мехатронных системах с ВИД исключить искажения от ШИМ сложнее. Это объясняется несинусоидальным питанием фазных обмоток двигателя, поэтому для получения численного решения с малым шумом фазного тока и момента, которое возникает при переключении напряжения с $+U_{\text{МАКС}}$ на значения 0 или $-U_{\text{МАКС}}$, при широтно-импульсной модуляции, необходимо применять специальные алгоритмы решения. Блок-схема использованного для этой цели алгоритма приведена на рис. 4.8.

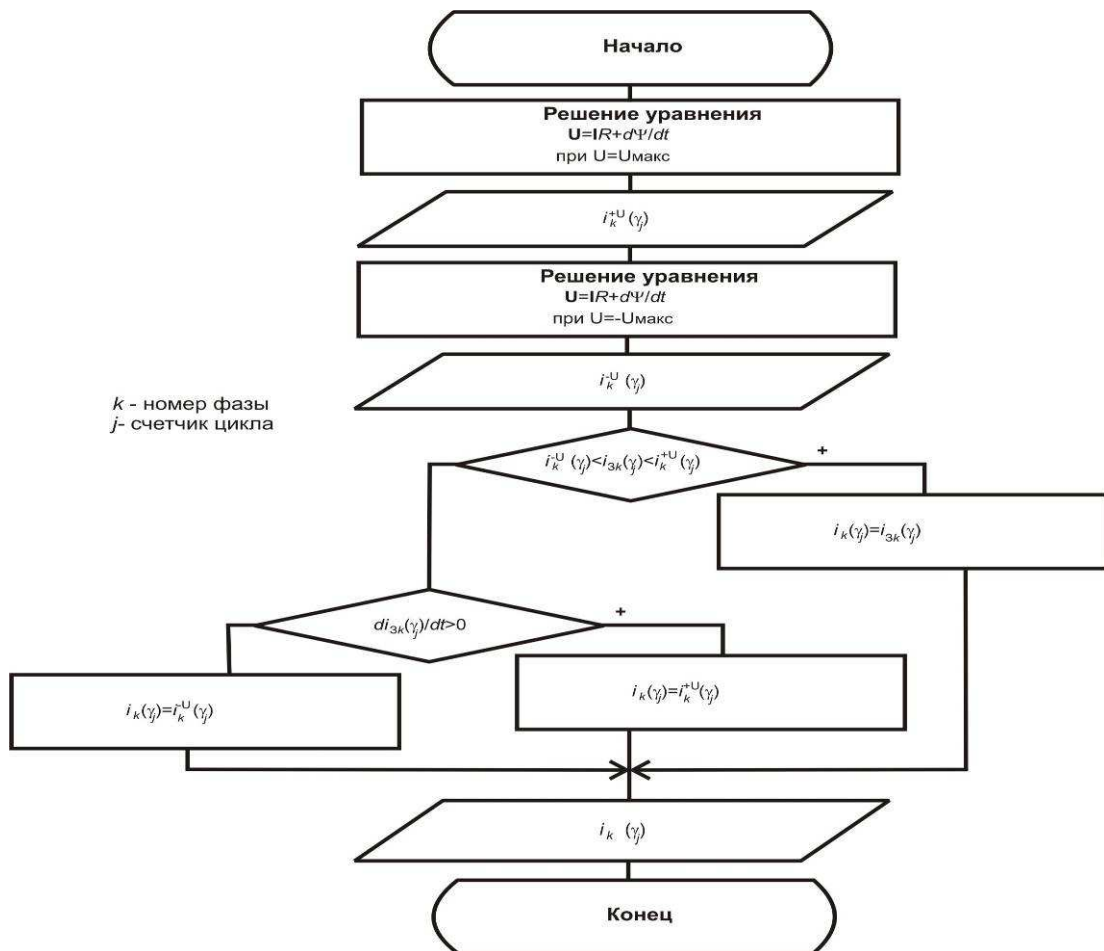


Рис. 4.8. Блок-схема алгоритма сглаживания тока и момента

При таком подходе к моделированию электромеханических характеристик становится возможным решение задачи поиска оптимальных зависимостей токового задания $I_3(\gamma)$, позволяющих минимизировать величину неравномерности момента k_H за счет ее распределения (дистрибуции) по фазам, например, так, как это показано на рис. 4.9., где использованы две формы фазного момента, таких, что суммарный фазный момент постоянен.

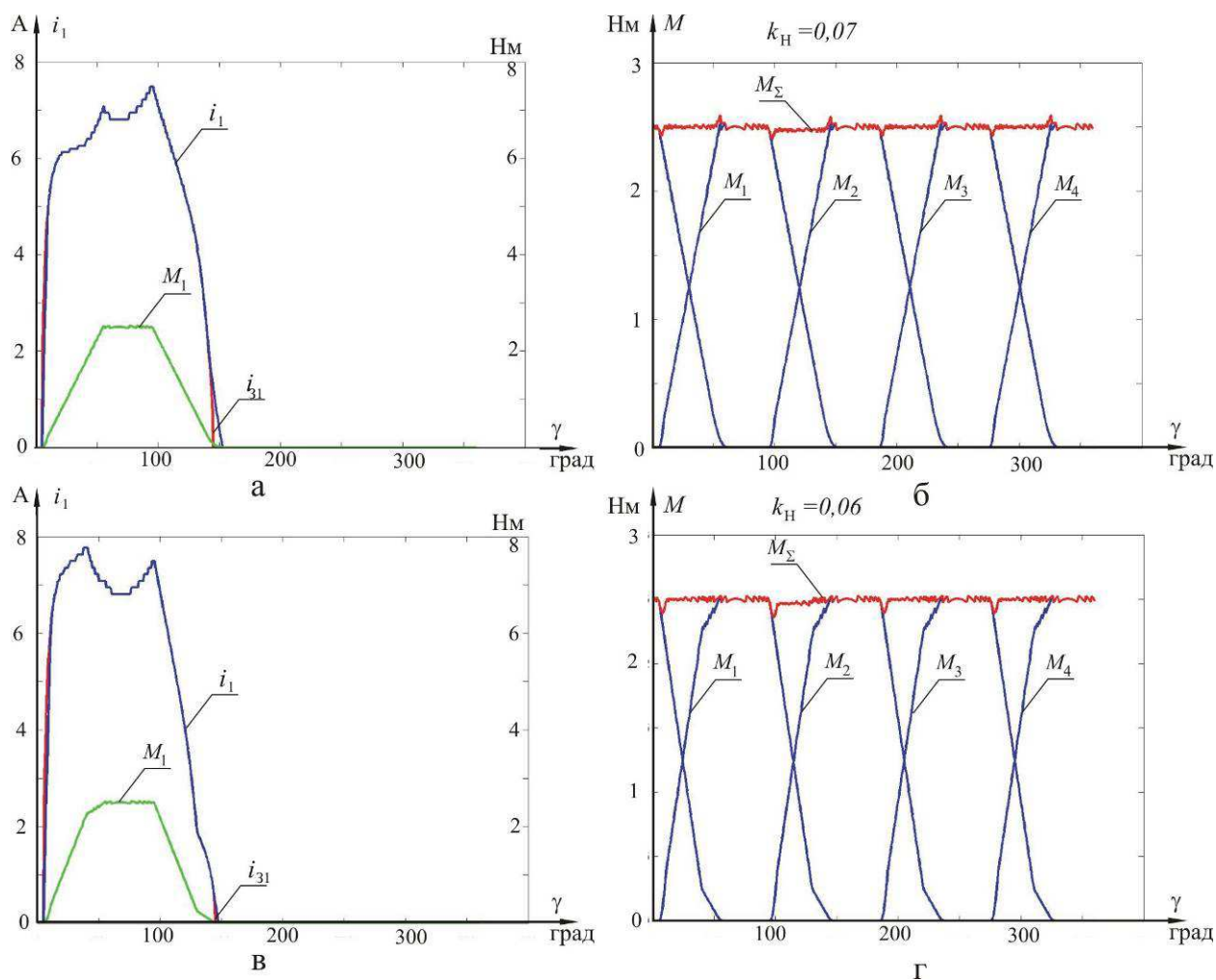


Рис. 4.9. Результаты моделирования ВИД с нелинейным токовым управлением:

а, в – ток и момент 1-ой фазы; б, г – момент 1,...,4 фаз и суммарный момент

То есть, весь электромагнитный момент электродвигателя разбивается на m участков, каждый из которых формируется своей фазой $M_3(\gamma)$, в самом простом (нереализуемом) случае на m прямоугольных участков. Далее на основе решения уравнения (3.16) получается функция тока от угла поворота $i_3(\gamma)$, на основе которой формируется функция токового задания. Следует отметить, что функция задания момента фазы $M_3(\gamma)$ многовариантная, вследствие чего для различных скоростей и нагрузок необходимо искать свою – оптимальную функцию. Более подробно вопрос минимизации неравномерности момента и оптимизации фазного тока будет рассмотрен в следующей главе работы.

Применение указанного подхода, основанного на использовании скоростных характеристик в задачах проектирования вентильно-индукторных двигателей для мехатронных систем, в частности, при разработке серии элек-

тродвигателей, предназначенных для насосов подкачки горячей воды объектов ЖКХ г. Москвы, позволило оптимально спроектировать машину с учетом специфики питания и управления, что сократило объем корректировок конструкторской документации на этапе ОКР после проведения испытаний. Также этот подход был применен при разработке тягового электродвигателя трамвая и ряда других эскизных проектов.

4.4 Расчет тепловых и предельных нагрузочных характеристик

Тепловая нагрузка на основные элементы электродвигателя определяет его работоспособность, надежность, срок эксплуатации. Современные тепловые методики и модели позволяют проводить детализированный анализ тепловых нагрузок на узлы и элементы электрической машины [7, 21, 22, 188, 215, 290]. Однако, как было отмечено в предыдущей главе, при наличии современных методик и подходов к моделированию тепловых нагрузок на элементы электродвигателей сложные методы и модели, тем не менее, оказываются неудобными при анализе и разработке мехатронных систем, в том числе из-за необходимости оперировать зависимостями тепловых нагрузок от частоты вращения. Кроме того, как показывает практика, в большинстве случаев сама зависимость превышения температуры в элементах от скорости вращения оказывается менее значима, чем зависимость длительной максимально допустимой механической нагрузки от частоты вращения – нагрузочная характеристика. Следует отметить, что типизированные нагрузочные характеристики, приводимые рядом производителей электродвигателей, весьма условны и не учитывают ряда факторов, например, таких, как уменьшение магнитных потерь от частоты вращения, вследствие вынужденного или сознательного упрощения. Поэтому проведение исследований уточняющих методики расчета тепловых скоростных характеристик, а именно, зависимостей перегрева основных элементов электрической машины от частоты вращения и предельных механических характеристик – нагрузочных характеристик, актуально и представляет первостепенную задачу.

При этом целесообразно выделить три составляющих указанной задачи [73]:

- оценка превышения температуры обмотки статора при изменении нагрузки, длины пакета активной части, способа охлаждения. Решение указанной подзадачи позволяет изменением длины масштабировать нагрузочную характеристику по уровню;

- оценка превышения температуры обмотки статора и допустимой нагрузки при изменении частоты вращения. Решение этой подзадачи позволяет проводить расчет нагрузочной характеристики электродвигателей;

- оценка тепловой перегрузочной способности – сервис-фактора электрической машины [122]. Важность величины сервис-фактора для частотно-регулируемых машин была отмечена в главе 2.

В настоящее время существует ряд точных методов расчета теплового состояния электрической машины. Эти методы основаны на расчете с использованием развернутых тепловых схем или на моделировании тепловых полей на основе метода конечных элементов. Применение точных методов, при расчете зависимостей тепловых нагрузок на элементы от частоты вращения, нецелесообразно из-за значительных временных затрат, необходимых для решения. Кроме того, такой подход требует точного задания всех параметров машины, как в активной, так и в конструктивной частях, что весьма трудоемко. Использование инженерных методов [7, 10, 229] в задачах расчета скоростных характеристик имеет большие перспективы, так как эти методы, как правило, построены на использовании метода эквивалентного тока или эквивалентных потерь и позволяют оценивать как средние значения превышения температуры в основных элементах машины, так и допустимые значения нагрузок при ограничении температуры обмотки. Однако решение задач, направленных на расчет тепловых и нагрузочных скоростных характеристик, оказывается затруднен, потому что присущие этим методам в их современном виде недостатки не позволяют применять их без существенных изменений.

Основой для предлагаемой методики послужило обобщение результатов расчета и анализа экспериментальных данных общепромышленных и частотно-

регулируемых двигателей, выпускаемых компаниями ООО «ПК«ВЭМЗ», ПАО «НИПТИЭМ» и ООО «Русэлпром-Мехатроника». В разработке предлагаемых уточнений для метода эквивалентных потерь, кроме автора, принимали участие его коллеги А.С. Кобелев и С.В. Кудряшов [73]. Учет особенностей работы асинхронных двигателей в частотно-регулируемом приводе проводился на основе обобщения опыта эксплуатации разработанных машин [33, 67, 68, 78], выпущенных предприятиями ПК «ВЭМЗ» [19, 33, 191] для различных отраслей промышленности и транспорта. Для теоретического исследования теплового состояния машины использовался метод эквивалентных тепловых схем на основе 17-и элементной схемы замещения электродвигателя в соответствии с РД.16.310-86 «Машины электрические вращающиеся средние от 56 до 355 габарита включительно. Двигатели асинхронные. Методика тепловых расчетов» [188]. Адекватность разработанных положений подтверждалась испытаниями серийно выпускаемых электрических машин в испытательном центре ПАО «НИПТИЭМ».

Критическим перегревом, определяющим надежность, для асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором закрытого обдуваемого исполнения является превышение температуры обмотки статора. Очевидно, что потери, которые выделяются в различных элементах машины (обмотка статора, обмотка ротора, сердечники магнитопровода, вращающиеся конструктивные части), вносят вклад в нагрев обмотки статора по-разному. Поэтому вопрос вычисления коэффициентов влияния потерь от разных источников на нагрев обмотки статора имеет первый приоритет.

Известный метод эквивалентных греющих потерь основан на принципе наложения, в соответствии с которым превышение температуры обмотки статора представляет собой суммарную величину от мощности собственных потерь обмотки и потерь, выделившихся в других элементах [7, 73]:

$$\Theta_{CU1} = (p_{CU1} + K_{CU2} p_{CU2} + K_{FE} p_{FE} + K_{MEH} p_{MEH}) \frac{\Theta_{CU1}^{BA3}}{p_{ГР}}, \quad (4.3)$$

где p_{CU1} , p_{CU2} , p_{FE} , p_{MEH} – мощность электрических потерь в обмотке статора, ротора, мощность магнитных потерь в сердечнике статора и суммарные механи-

ческие потери в подшипниках и вентиляторе; K_{CU2} , K_{FE} , K_{MEX} – коэффициенты влияния соответствующих составляющих потерь; Θ_{CU1}^{BA3} – перегрев обмотки статора базового двигателя; $p_{ГР}^{BA3}$ – потери в базовом двигателе.

Определение коэффициентов влияния можно проводить различными способами, однако целесообразно использовать следующий подход, при котором в элементы тепловой модели: обмотку статора – «CU1», обмотку ротора – «CU2», сердечник статора – «FE», механические вращающиеся части – «MEX» последовательно помещаются одинаковые по мощности потери, например, все потери электрической машины $p_{\Sigma} = p_{CU1} + p_{CU2} + p_{FE} + p_{MEX}$, после чего находится соответствующее им превышение температуры обмотки статора $\Theta_{CU1}^{CU1} = \Theta_{CU1}$, Θ_{CU1}^{CU2} , Θ_{CU1}^{FE} , Θ_{CU1}^{MEX} .

Отношения полученных превышений температуры обмотки статора

$$K_{CU1} = \frac{\Theta_{CU1}^{CU2}}{\Theta_{CU1}}, K_{FE} = \frac{\Theta_{CU1}^{FE}}{\Theta_{CU1}}, K_{MEX} = \frac{\Theta_{CU1}^{MEX}}{\Theta_{CU1}}$$

определяют соответствующие коэффициенты влияния, входящие в выражение для расчета эквивалентной мощности греющих потерь:

$$p_{ГР} = p_{CU1} + K_{CU2} p_{CU2} + K_{FE} p_{FE} + K_{MEX} p_{MEX}. \quad (4.4)$$

На основе изложенного подхода, а также методики поверочного теплового расчета были определены коэффициенты влияния потерь на температуру обмотки статора для широкого спектра современных закрытых обдуваемых асинхронных электродвигателей серии 6А, значения которых представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4. Коэффициенты влияния потерь на нагрев обмотки статора

Двигатель	K_{CU2}	K_{FE}	K_{MEX}	Двигатель	K_{CU2}	K_{FE}	K_{MEX}
6A132SB2	0,71	0,5	0,12	6A280M2	0,65	0,49	0,20
6A132M4	0,69	0,6	0,13	6A280M4	0,65	0,55	0,19
6A132MB6	0,75	0,73	0,15	6A280M6	0,65	0,57	0,14
6A132M8	0,73	0,72	0,14	6A280M8	0,65	0,65	0,15
6A225M2	0,60	0,45	0,15	6A315LB2	0,71	0,54	0,30
6A225M4	0,60	0,54	0,14	6A315LB4	0,71	0,46	0,21
6A225M6	0,67	0,64	0,15	6A315LB6	0,65	0,61	0,17
6A225M8	0,68	0,7	0,15	6A315LB8	0,67	0,67	0,17
среднее	0,68	0,61	0,14	среднее	0,67	0,57	0,19

Анализ полученных значений коэффициентов влияния, приведенных в таблице 4.4, а также экспериментальные исследования показали, что с достаточной точностью можно принять следующие значения коэффициентов и распространить их на другие серии закрытых обдуваемых асинхронных электродвигателей (АИР, 5А, 5АМ, 7АВЕ): для обмотки ротора $K_{CU2} = 0,7$; для сердечника статора $K_{FE} = 0,6$; для механических потерь $K_{МЕХ} = 0,15$.

Расчет превышения температуры обмотки статора в исследуемом режиме, в случае, если известны параметры нагрева в другом (базовом, номинальном) режиме, можно вычислить по формуле:

$$\Theta_{CU1} = \Theta_{CU1}^{БАЗ} \frac{p_{ГР}}{p_{ГР}^{БАЗ}}, \quad (4.5)$$

где $p_{ГР}$ – мощности эквивалентных греющих потерь двигателя в исследуемом режиме; $p_{ГР}^{БАЗ}$ – мощность эквивалентных греющих потерь двигателя в базовом режиме. При расчетах с помощью выражения (4.3) необходимо использовать потери в базовом режиме, рассчитанные или измеренные, приведенные к реальной температуре.

Формулы (4.3), (4.5) позволяют проводить оценку превышения температуры обмотки статора при изменении нагрузки, незначительных изменениях пазово-зубцовой геометрии и обмоточных данных. Значительные изменения пазово-зубцовой геометрии статора, например, изменение числа зубцов, изменение глубины паза, существенное (15-20%) изменение коэффициента заполнения паза медью, снижает точность оценки.

Уточнением метода эквивалентных потерь стала формула расчета превышения температуры статора при изменении длины пакета, для вывода которой был использован аппарат тепловых поверочных расчетов. Исследования показали, что влияние длины пакета на превышение температуры обмотки можно с достаточной точностью учесть формулой:

$$\Theta_{CU1} = \Theta_{CU1}^{БАЗ} \frac{p_{ГР}}{p_{ГР}^{БАЗ}} \left(\frac{L_1^{БАЗ}}{L_1} \right)^{0.5}, \quad (4.6)$$

где L_1 , $L_1^{БАЗ}$ – соответственно активные длины сердечника статора исследуемого и базового двигателя.

Важным уточнение метода эквивалентных потерь стал вывод зависимостей, позволяющих рассчитать превышение температуры статора при изменении способа и интенсивности вентиляции. Вопрос о допустимой нагрузке, или, иначе, конкретной величине снижения мощности, при которой электрическая машина будет надежно работать без дополнительного перегрева при изменении интенсивности вентиляции, представляет повышенный интерес, поскольку актуален при разработке двигателей, работающих на разных частотах вращения. Решения данной задачи основано на использовании упрощенной тепловой схемы замещения закрытого обдуваемого электродвигателя [73, 138, 144] см. рис. 3.15. В схеме по рис. 3.15 исключены из рассмотрения механические потери (отнесены к внешним факторам). Кроме того, из нее исключены теплоемкости, так как рассматривается установившийся режим.

Последовательно помещая одинаковую мощность потерь p_{Σ} в основные элементы схемы, можно выразить величину превышения температуры обмотки статора от основных составляющих потерь:

$$\Theta_{CU1} = p_{\Sigma}(R1 + R3), \Theta_{CU1}^{CU2} = \Theta_{FE} = p_{\Sigma}R3, \Theta_{CU1}^{FE} = \Theta_{FE} = p_{\Sigma}R3, \quad (4.7)$$

Введем обобщенный коэффициент влияния составляющих потерь в роторе и сердечнике статора на нагрев обмотки статора $K_{\Theta} = \frac{R3}{R1 + R3}$, тогда из (4.7) следует, что этот коэффициент одинаков для потерь в обмотке ротора и потерь в сердечнике статора (вследствие упрощающих допущений об отсутствии перепадов температур в сердечнике статора и игнорировании путей теплоотдачи внутри двигателя). В реальности коэффициенты влияния потерь, выделяемых в роторе и сердечнике, отличаются друг от друга, но это будет учтено позднее.

В закрытых электродвигателях внутренняя вентиляция не оказывает существенного влияния на среднюю температуру обмотки статора: потери, выделившиеся в обмотках, передаются сердечнику и отводятся от корпуса. Поэтому можно принять, что при изменении интенсивности вентиляции изменяется только тепловое сопротивление между сердечником статора и воздухом, обусловленное течением воздуха в межреберных каналах станины.

Следовательно, на основании упрощенной тепловой схемы замещения и формулы (4.3) можно записать следующее выражение:

$$\frac{\Theta_{CU1}}{\Theta_{CU2}^{BA3}} = \frac{p_{CU1} R1 + (p_{CU1} + p_{CU2} + p_{FE}) \frac{R3}{\beta}}{p_{CU1}^{BA3} R1 + (p_{CU1}^{BA3} + p_{CU2}^{BA3} + p_{FE}^{BA3}) R3}, \quad (4.8)$$

используемое коэффициент изменения теплоотдачи с корпуса β для учета изменения вентиляции.

Составляющие потерь мощности в основных элементах частотно-регулируемого электродвигателя, работающего при постоянстве магнитного потока, могут быть представлены с помощью соотношений:

$$\begin{aligned} p_{CU1} &= K_{MD}^2 (p_{CU1}^{BA3} - p_{CU1}^{XX}) + p_{CU1}^{XX}, \\ p_{CU2} &= K_{MD}^2 p_{CU2}^{BA3}, \\ p_{FE} &= K_f^{1,3} p_{FE}^{BA3}, \end{aligned}$$

где $K_{MD} = M / M^{BA3}$ – кратность длительного момента исследуемого и базового режима; $K_f = f_1 / f_1^{BA3}$ – отношение частот напряжения питания исследуемого и базового режима; p_{CU1}^{XX} – мощность потерь в обмотке статора на холостом ходу. Это означает справедливость выражения:

$$K_{MD} = \frac{M}{M^{BA3}} = \frac{P_2}{P_2^{BA3}} = \frac{I_2'}{I_2'^{BA3}} \cong \frac{I_1}{I_1^{BA3}}. \quad (4.9)$$

Следовательно, отношение превышений температур статора в исследуемом и базовом режимах на основании (4.8) и (4.9), с учетом упрощенной тепловой схемы по рис. 3.15 можно представить в виде:

$$K_{\Theta} = \frac{\Theta_{CU1}}{\Theta_{CU1}^{BA3}} = \frac{K_T K_{MD}^2 p_{CU1}^{BA3} R1 + [K_T K_{MD}^2 (p_{CU1}^{BA3} + p_{CU2}^{BA3}) + K_f^{1,3} p_{FE}^{BA3}] \frac{R3}{\beta}}{p_{CU1}^{BA3} R1 + (p_{CU1}^{BA3} + p_{CU2}^{BA3} + p_{FE}^{BA3}) R3},$$

где $K_T = \frac{1 + 0,004 \Theta_{CU1}^{BA3} K_{\Theta}}{1 + 0,004 \Theta_{CU1}^{BA3}}$ – коэффициент изменения активного сопротивления обмоток при изменении температуры.

Упростив полученное выражение, можно получить окончательную формулу кратности превышений температур:

$$K_{\Theta} = \frac{\Theta_{CU1}}{\Theta_{BA3}} = [K_T K_{MD}^2 (1 - K_{01}) + K_{01} K_f^{1,3}] + \left[K_T K_{MD}^2 \left(\frac{K_{01}}{K_0} - K_{01} \right) + K_{01} K_f^{1,3} \right] \frac{(1 - \beta)}{\beta}, \quad (4.10)$$

где коэффициенты потерь и греющих потерь вычисляются по формулам:

$$K_0 = \frac{p_{FE}}{p_{CU1} + p_{CU2} + p_{FE}}; \quad (4.11)$$

$$K_{01} = \frac{K_{\Theta} p_{Fe}}{p_{CU1} + K_{\Theta} p_{CU2} + K_{\Theta} p_{FE}}.$$

В завершении необходимо уточнить значения коэффициентов K_{01} , K_0 , заменяя обобщенный коэффициент влияния потерь на реальные коэффициенты влияния из табл. 4.1:

$$K_0 = \frac{p_{FE}}{p_{CU1} + p_{CU1} + p_{FE}}; \quad (4.12)$$

$$K_{01} = \frac{K_{FE} p_{FE}}{p_{CU1} + K_{CU2} p_{CU2} + K_{FE} p_{FE}}.$$

Из полученных выражений нетрудно получить формулу для оценки допустимой нагрузки при изменении интенсивности охлаждения:

$$K_{MD} = \frac{M}{M_{BA3}} = \sqrt{\frac{K_{\Theta} \beta - K_{01} K_f^{1,3}}{K_T \left[(1 - K_{01}) \beta + \left(\frac{K_{01}}{K_0} - K_{01} \right) (1 - \beta) \right]}}. \quad (4.13)$$

В таблицах 4.5, 4.6 приведены значения коэффициентов K_0 , K_{01} , мощности греющих потерь $p_{ГР}$, средние значения перегревов обмоток статора Θ_{CU1} , коэффициент ухудшения охлаждения при отсутствии вентиляции β_0 для общепромышленных электродвигателей основного исполнения производства ООО «ПК«ВЭМЗ», ПАО «НИПТИЭМ. Эти данные получены на основании обобщения автором и его коллегами [73] многочисленных типовых и периодических испытаний, проводимых испытательными лабораториями «ВЭМЗ» и «НИПТИЭМ» в период с 2000-2013гг.

Как правило, параметры вентиляции (расход и напор воздуха) электродвигателей с пристроенной независимой вентиляцией соответствуют аналогичным параметрам самовентилируемых машин. Поэтому коэффициент изменения интенсивности теплоотдачи с корпуса β при использовании незави-

симой вентиляции принимается равным единице ($IC416, \beta = 1$) на всех частотах вращения. Для невентилируемых электродвигателей (естественное охлаждение) коэффициент изменения интенсивности теплоотдачи с корпуса β принимается равным β_0 ($IC410, \beta = \beta_0$) в соответствии с данными таблиц 4.5, 4.6. Величина коэффициента изменения теплоотдачи с корпуса в диапазоне относительного изменения частоты вращения: $0,15 \leq n/n_H \leq 1,5$ для самовентилируемых электродвигателей ($IC411$) на частоте вращения $n \neq n_H$ рассчитывается по формулам:

$$\beta = 1 + 0,3 \cdot \ln \frac{n}{n_H}, \text{ или } \beta = \left(\frac{n}{n_H} \right)^{0,34}. \quad (4.14)$$

Выражение (4.14) было получено в результате аналитического обобщения данных многочисленных опытов моделирования температурных полей электродвигателей, проведенных на основе поверочного теплового расчета, и проверено экспериментально для электродвигателей с ВОВ 112, 132, 180, 280 мм и $2p=2, 4$.

Таблица 4.5. Основные коэффициенты, потери, перегревы для АЭД серии 5А

№	Тип	$p_{гр},$ Вт	K_{01}	K_0	β_0	$\Theta_{сш1},$ °C	Тип	$p_{гр},$ Вт	K_{01}	K_0	β_0	$\Theta_{сш1},$ °C
1	80MA2	262	0,114	0,164	0,30	66,0	80MA4	331	0,145	0,207	0,30	71,0
2	80MB2	389	0,103	0,146	0,30	76,4	80MB4	412	0,121	0,173	0,30	77,2
3	112M2	662	0,150	0,205	0,30	67,1	112M4	649	0,187	0,253	0,30	73,0
4	132M2	888	0,131	0,183	0,32	78,5	132S4	760	0,171	0,234	0,31	67,8
5	160S2	1016	0,144	0,198	0,32	69,4	132M4	1028	0,151	0,206	0,31	78,2
6	160M2	1163	0,159	0,216	0,32	68,0	160S4	1316	0,150	0,205	0,31	76,7
7	180S2	1580	0,125	0,174	0,32	87,5	160M4	1594	0,161	0,218	0,31	82,7
8	180M2	1852	0,149	0,203	0,32	90,1	180S4	1700	0,148	0,208	0,34	82,4
9	200M2	1738	0,173	0,231	0,32	78,5	180M4	2073	0,142	0,198	0,34	90,0
10	200L2	1998	0,169	0,226	0,32	82,5	200M4	2422	0,136	0,189	0,31	93,5
11	225M2	2384	0,136	0,187	0,32	89,9	200L4	2610	0,173	0,236	0,31	90,6
12	250S2	2675	0,163	0,221	0,32	75,4	225M4	2798	0,146	0,203	0,31	91,5
13	250M2	3299	0,134	0,184	0,32	84,5	250S4	2980	0,206	0,282	0,31	73,2
14	280S2	3693	0,136	0,189	0,32	91,1	250M4	3306	0,178	0,244	0,31	81,0
15	280M2	3837	0,176	0,238	0,32	89,5	280S4e	3590	0,214	0,285	0,32	81,0
16	315S2	4168	0,191	0,257	0,32	89,7	280M4e	3474	0,254	0,332	0,32	77,0
17	315MA2	4510	0,210	0,279	0,32	91,5	315S4e	4522	0,214	0,284	0,34	80,4
18	315MB2	5229	0,236	0,311	0,32	107,0	315M4	5154	0,217	0,286	0,34	89,3

Таблица 4.6. Основные коэффициенты, потери, перегревы для АЭД серии 5А

№	Тип	$p_{ГР},$ Вт	K_{01}	K_0	β_0	$\Theta_{CU1},$ °C	Тип	$p_{ГР},$ Вт	K_{01}	K_0	β_0	$\Theta_{CU1},$ °C
1	80МА6	260	0,138	0,199	0,30	52,0	80МА8	233	0,186	0,264	0,28	54,0
2	80МВ6	383	0,147	0,210	0,30	67,8	80МВ8	332	0,184	0,265	0,28	72,0
3	112МА6	561	0,172	0,239	0,31	63,5	112МА8	498	0,128	0,184	0,28	64,6
4	112МВ6	729	0,146	0,204	0,31	79,8	112МВ8	611	0,129	0,184	0,28	79,5
5	132S6	823	0,109	0,157	0,31	71,7	132S8	738	0,118	0,169	0,28	70,0
6	132M6	997	0,128	0,182	0,31	73,6	132M8	924	0,117	0,167	0,28	74,2
7	160S6	1201	0,150	0,211	0,31	69,2	160S8	977	0,149	0,211	0,29	66,3
8	160M6	1482	0,186	0,256	0,31	71,5	160M8	1377	0,117	0,165	0,29	79,5
9	180M6	1607	0,158	0,220	0,32	69,6	180M8	1738	0,090	0,132	0,30	84,5
10	200M6	1791	0,168	0,234	0,31	70,9	200M8	1721	0,151	0,215	0,31	71,3
11	200L6	2528	0,168	0,233	0,31	91,2	200L8	2110	0,137	0,197	0,31	85,7
12	225M6	2530	0,231	0,312	0,35	79,5	225M8	2273	0,141	0,199	0,31	81,3
13	250S6	2460	0,141	0,202	0,37	72,1	250S8	2605	0,166	0,240	0,35	73,0
14	250M6	3217	0,146	0,208	0,37	87,6	250M8	2690	0,165	0,236	0,35	70,2
15	280S6e	3007	0,195	0,267	0,39	69,3	280S8e	2502	0,196	0,268	0,43	61,5
16	280M6e	3469	0,202	0,273	0,39	80,2	280M8e	3371	0,223	0,301	0,43	78,0
17	315S6e	4282	0,272	0,356	0,40	84,2	315S8e	3582	0,251	0,334	0,43	70,0
18	315МА6	4618	0,242	0,320	0,40	77,0	315МА8	4640	0,257	0,341	0,43	86,9
19	315МВ6	5655	0,258	0,337	0,40	93,6	315МВ8	4952	0,268	0,352	0,43	88,4

Целесообразно упростить выражение (4.10), зная, как соотносятся между собой коэффициенты K_0 и K_{01} , взятые из таблиц 4.5, 4.6, в итоге можно записать упрощенные выражения для расчета величины превышения температуры обмотки статора при различных типах охлаждения электродвигателя, работающего при номинальном магнитном потоке:

$$\Theta_{IC410} = \Theta_{M1} \frac{K_T K_{MD}^2 (0,75 + 0,25\beta_0 - K_{01}) + K_{01} \left(\frac{f_1}{f_H} \right)^{1,3}}{\beta_0}, \quad (4.15)$$

$$\Theta_{IC411} = \Theta_{M1} \frac{K_T K_{MD}^2 (0,75 + 0,25\beta - K_{01}) + K_{01} \left(\frac{f_1}{f_H} \right)^{1,3}}{\beta}, \quad (4.16)$$

$$\Theta_{IC416} = \Theta_{M1} \left[K_T K_{MD}^2 (1 - K_{01}) + K_{01} \left(\frac{f_1}{f_H} \right)^{1,3} \right] \quad (4.17)$$

Величина допустимой нагрузки электродвигателя, работающего при номинальном магнитном потоке в продолжительном режиме с номинальным

превышением температуры обмотки, определяется с помощью следующих формул:

$$M_{IC410} = M_H \sqrt{\frac{K_\Theta \beta_0 - K_{01} \left(\frac{f_1}{f_H} \right)^{1,3}}{K_T (0,75 + 0,25 \beta_0 - K_{01})}}, \quad (4.18)$$

$$M_{IC411} = M_H \sqrt{\frac{K_\Theta \beta - K_{01} \left(\frac{f_1}{f_H} \right)^{1,3}}{K_T (0,75 + 0,25 \beta - K_{01})}}, \quad (4.19)$$

$$M_{IC416} = M_H \sqrt{\frac{K_\Theta - K_{01} \left(\frac{f_1}{f_H} \right)^{1,3}}{K_T (1 - K_{01})}}. \quad (4.20)$$

В формулах (4.18), (4.19) величину коэффициента изменения интенсивности вентиляции следует рассчитывать по формуле:

$$\beta = \left[\frac{f_1}{f_H} \left(1 - s_H \frac{f_H}{f_1} \right) \right]^{0,34}.$$

Пример механических характеристик, для двигателя с $K_0=0,20$; $K_{01}=0,15$; $\beta_0=0,31$ (5A225M4) получаемых с помощью выражений (4.14), (4.18) - (4.20), показан на рис. 4.10.

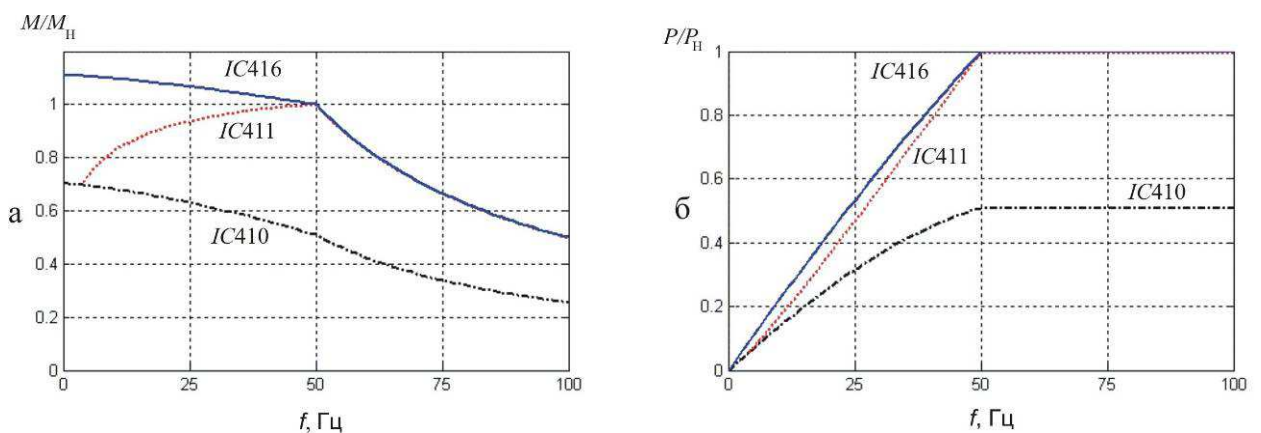


Рис. 4.10. Механические характеристики электродвигателя при различных типах охлаждения:

а – зависимость момента от частоты; б – зависимость мощности от частоты

В верхней части ячейки таблицы 4.7 приведены значения зависимости относительного снижения момента от частоты вращения, рассчитанной при

постоянном перегреве. В нижней части ячейки таблицы 4.7 показаны значения относительного изменения перегрева обмотки статора в зависимости от частоты вращения, полученные при условии постоянного момента нагрузки. Значения рассчитаны для различной величины коэффициента греющих потерь K_{01} электродвигателя с самовентиляцией IC411. Значения величины перегрева получены итерационно и учитывают коэффициент K_T .

Таблица 4.7. Коэффициенты снижения мощности (увеличения перегрева)

K_{01}	n/n_H								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,1	0,805	0,874	0,914	0,914	0,961	0,975	0,986	0,994	1,00
	1,84	1,43	1,26	1,16	1,10	1,06	1,03	1,01	1,00
0,12	0,813	0,882	0,921	0,948	0,966	0,979	0,988	0,995	1,00
	1,77	1,39	1,23	1,14	1,09	1,05	1,03	1,01	1,00
0,14	0,822	0,89	0,929	0,954	0,971	0,983	0,991	0,997	1,00
	1,708	1,35	1,20	1,12	1,07	1,04	1,02	1,01	1,00
0,16	0,832	0,90	0,937	0,961	0,977	0,987	0,994	0,998	1,00
	1,65	1,32	1,18	1,10	1,06	1,03	1,01	1,01	1,00
0,18	0,841	0,908	0,948	0,968	0,982	0,992	0,997	1,00	1,00
	1,59	1,28	1,15	1,08	1,04	1,02	1,01	1,00	1,00
0,2	0,852	0,917	0,953	0,975	0,988	0,996	1,00	1,00	1,00
	1,53	1,24	1,12	1,06	1,03	1,01	1,00	1,00	1,00
0,22	0,862	0,927	0,962	0,983	0,995	1,00	1,00	1,00	1,00
	1,47	1,21	1,10	1,04	1,01	1,00	1,00	1,00	1,00
0,24	0,873	0,938	0,971	0,991	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	1,42	1,17	1,07	1,02	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,26	0,885	0,949	0,981	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	1,37	1,14	1,04	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,28	0,987	0,96	0,991	1,01	1,02	1,01	1,01	1,01	1,00
	1,31	1,10	1,02	0,98	0,969	0,967	0,97	0,985	1,00

На рисунках 4.11 - 4.14 приведены зависимости момента от частоты вращения (нагрузочные характеристики) и зависимость мощности от частоты вращения, полученные на основе формул (2.4), (4.14), (4.18) - (4.20) для общепромышленных электродвигателей унифицированных серий асинхронных двигателей 4A, 5A, 7AVER с BOB 160мм, $2p=4$ номинальной мощностью 18,5 кВт. Данные получены при условии ограничения величины превышения температуры обмотки статора значением 92°C , что соответствует значению сервис-фактора 1,10. При расчете предельных нагрузочных характеристик учтено падение напряжения на инверторе, с помощью изменения номинальной режима

питания на значение параметров 360В, 47Гц для компенсации магнитного потока машины, а также увеличение температуры обмотки из-за влияния ШИМ.

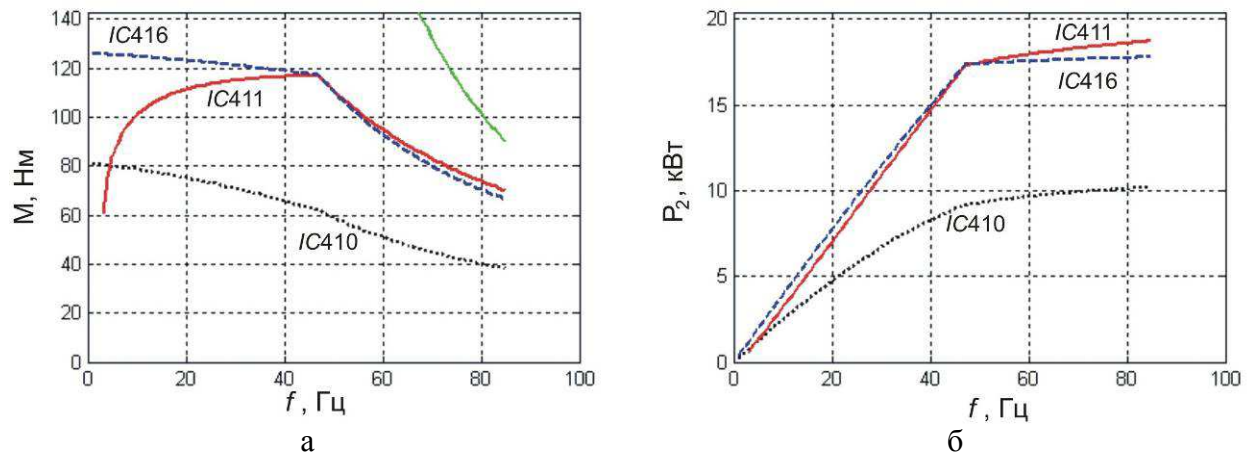


Рис. 4.11. Механические характеристики электродвигателя 4A160M4 18,5кВт, 1500 об/мин при различных типах охлаждения

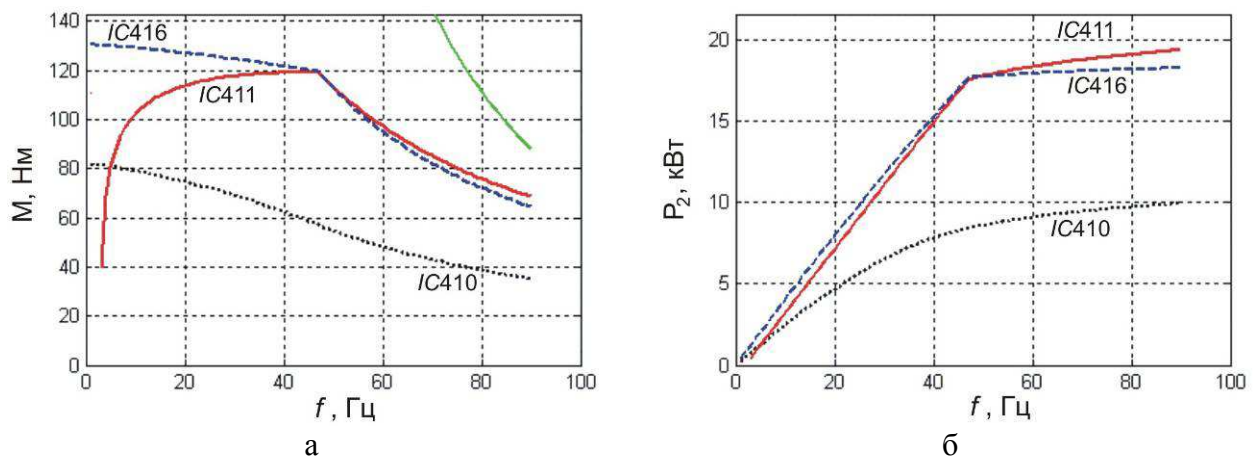


Рис. 4.12. Механические характеристики электродвигателя 5A160M4 18,5кВт, 1500 об/мин при различных типах охлаждения

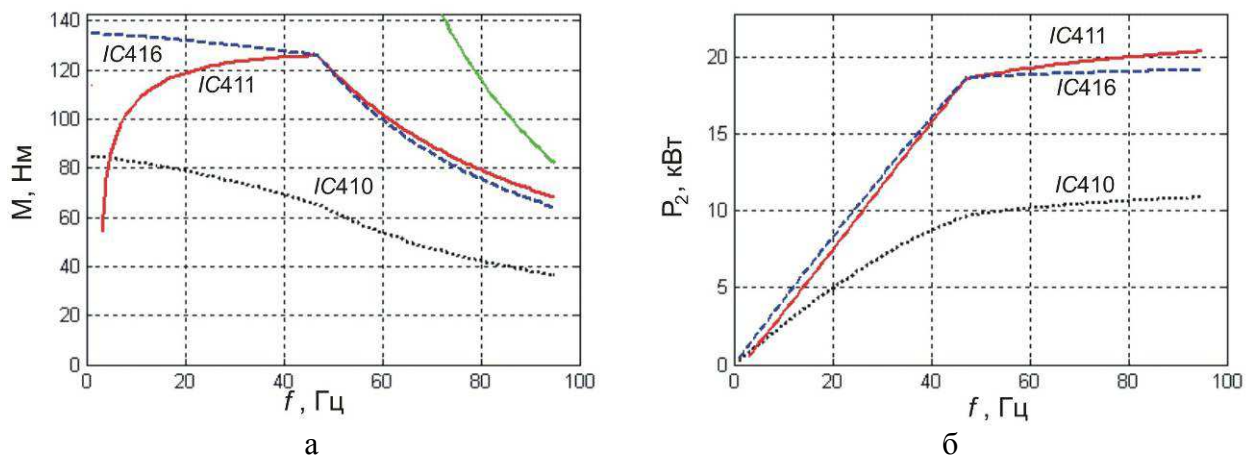


Рис. 4.13. Механические характеристики электродвигателя 7AVER160M4ie1 18,5кВт 1500 об/мин при различных типах охлаждения

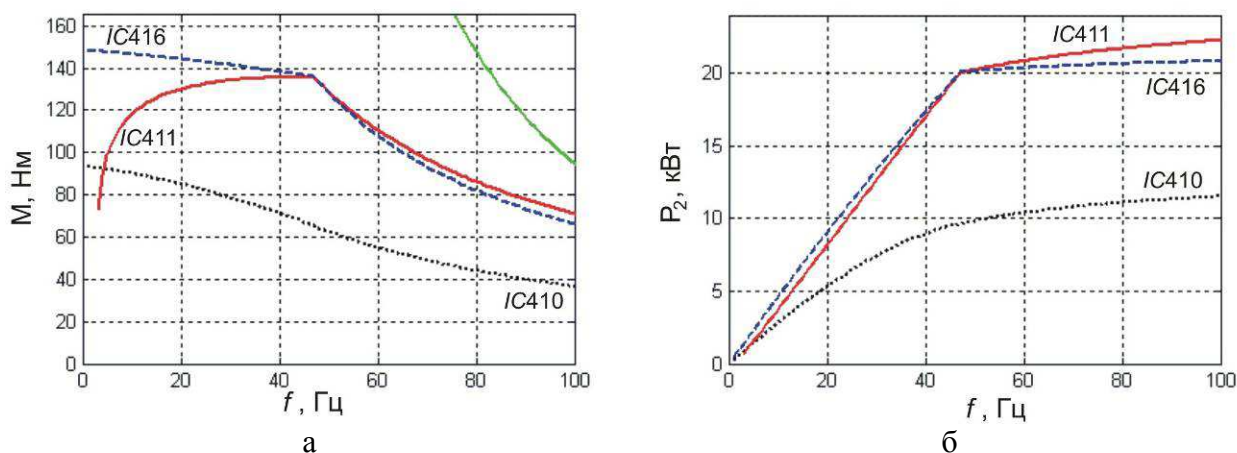


Рис. 4.14. Механические характеристики электродвигателя 7AVER160M4ie2 18,5кВт 1500 об/мин при различных типах охлаждения

Анализ данных, приведенных на графиках предельных механических характеристик, показывает, что в результате эволюционного развития электромашиностроения в направлении увеличения энергетических показателей также увеличивается диапазон регулирования электродвигателей. Так первая зона механической характеристики самовентилируемого двигателя (IC411), характеризующаяся номинальным моментом 120 Нм, на машине серии 4А может быть получена только на номинальной частоте. На двигателях серии 5А номинальный момент может быть получен в диапазоне 30-47Гц, на электродвигателях серии 7AVE номинальный момент может быть получен в диапазоне 20-47Гц и 10-47Гц, для нормального и повышенного класса энергоэффективности соответственно. Глубина регулирования во второй зоне механической характеристики также возрастает 47-85Гц для серии 4А, 47-90Гц для серии 5А, 47-95Гц и 47-120Гц для нормального и высокого классов энергоэффективности электродвигателей серии 7AVE.

Приведенные в формулы оценки перегрева (4.14) - (4.17) и допустимой мощности (4.14), (4.18) - (4.20) подтверждены экспериментально в испытательном центре «НИПТИЭМ» на закрытых обдуваемых электродвигателях серий 5АМ, АИРМ, 5А, АДЧР.

Рассмотрим вопрос уточненного расчета величины сервис-фактора, учитывающего величину коэффициента K_{01} . Сервис-фактор – предельное отношение повышенной мощности к номинальной, при котором превышение

температуры обмотки не должно быть больше допустимого на 10 %, – рассчитывается по формуле:

$$SF = \sqrt{\frac{\frac{\Theta_{\Pi} - K_{01}}{\Theta_{CU1}}}{K_T(1 - K_{01})}} \quad (4.21)$$

где Θ_{Π} – предельное превышение температуры обмотки статора; Θ_{CU1} – расчетное (измеренное) превышение температуры обмотки статора. В таблице 4.8 приведены значения зависимости сервис-фактора SF от значения перегрева обмотки, при различных значениях коэффициента K_{01} .

Таблица 4.8. Сервис-фактор

K_{01}	$\Theta^{BA3}, ^\circ C$							
	40	50	60	70	80	90	100	110
K_T	1,24	1,2	1,16	1,125	1,09	1,059	1,029	1,0
0,12	1,55	1,40	1,29	1,21	1,14	1,09	1,04	1
0,16	1,58	1,42	1,31	1,22	1,15	1,09	1,04	1
0,20	1,60	1,44	1,33	1,23	1,16	1,1	1,05	1
0,24	1,63	1,47	1,34	1,25	1,17	1,1	1,05	1
0,28	1,66	1,49	1,36	1,26	1,18	1,1	1,05	1

Значения параметров упрощенной тепловой схемы замещения (рис. 3.15) представляют большой интерес. Эти величины используются как при анализе установившихся процессов, так и при моделировании динамических тепловых процессов. При этом наибольшую сложность для определения представляют тепловые сопротивления $R1, R2, R3$. Примерное соотношение между ними установлено величиной обобщенного коэффициента влияния потерь – K_{Σ} , однако эта величина требует уточнения, так как определяет значения, получаемые при моделировании тепловых процессов. Для расчета тепловых сопротивлений упрощенной тепловой схемы замещения требуется получить дополнительные данные установившихся режимов, которые приведены в таблице 4.9

Запишем соотношения, связывающие потери и значения превышений температуры, в упрощенной тепловой схеме (рис. 3.15), считая процесс установившимся:

$$\begin{cases} \Theta_{CU1} = p_{CU1}(R1 + R3) + p_{CU2}R3 + p_{FE}R3, \\ \Theta_{CU2} = p_{CU2}(R2 + R3) + p_{CU1}R3 + p_{FE}R3, \\ \Theta_{FE} = p_{FE}R3 + p_{CU1}R3 + p_{CU2}R3. \end{cases} \quad (4.22)$$

Решая систему уравнений относительно $R1$, $R2$, $R3$, нетрудно найти:

$$\begin{cases} R3 = \frac{\Theta_{FE}}{p_{CU1} + p_{CU2} + p_{FE}}, \\ R2 = \frac{\Theta_{CU2} - \Theta_{FE}}{p_{CU2}}, \\ R1 = \frac{\Theta_{CU1} - \Theta_{FE}}{p_{CU1}}. \end{cases} \quad (4.23)$$

В выражениях (4.23) значения превышения температур обмотки ротора и корпуса можно найти, используя данные таблицы 4.9 и выражений:

$$\Theta_{FE} = \Theta_{CU1} \left(\frac{\Theta_{CU1}}{\Theta_{FE}} \right)^{-1},$$

$$\Theta_{CU2} = \Theta_{CU1} \left(\frac{\Theta_{CU2}}{\Theta_{CU1}} \right).$$

Таблица 4.9. Экспериментальные отношения превышения температур в узлах

h , мм	Θ_{CU1}/Θ_{FE}				$\Theta_{CU2}/\Theta_{CU1}$			
	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$
112	2,3	1,7	1,5	1,5	1,5	1,4	1,3	1,1
132	2,7	1,9	1,8	1,7	1,5	1,4	1,3	1,1
160	2,3	2,0	1,6	1,5	1,4	1,5	1,3	1,1
180	2,7	2,0	1,9	1,7	1,4	1,6	1,3	1,2
200	2,2	2,0	1,6	1,5	1,4	1,5	1,2	1,1
225	2,7	2,0	1,8	1,6	1,4	1,5	1,3	1,2
250	2,2	2,0	1,8	1,7	1,3	1,2	1,3	1,3
280	2,2	2,2	1,8	1,8	1,3	1,2	1,4	1,1
315	2,3	2,0	1,9	1,8	1,3	1,4	1,4	1,3

Оценка точности трехмассовой тепловой модели с параметрами схемы замещения, полученными на основе формул (4.23), проиллюстрирована диаграммой на рис. 3.16б. Оценка погрешности расчета превышения температуры обмотки статора для установившегося режима, установленная для электродвигателей с ВОВ 132, 160, 200, 225, 280, не превышала 5°C . Максимальная погрешность моделирования неустойчивого процесса нагрева обмотки

статора для тех же электродвигателей не превышала 8°C . При верификации в основном были использованы кривые остывания, так как при этом исключаются погрешности, связанные с изменением потерь от изменения температуры, и погрешности, связанные с временной задержкой измерения. Оценка точности моделирования цикла, имеющего более шести включений, проводилась на специальном электродвигателе А112, предназначенном для изделия «Концерн ПВО «Алмаз-Антей». При этом для изделия были промоделированы основные режимы работы, один из которых (типовой) был проверен экспериментально. Максимальная погрешность моделирования составила 13°C по участкам нагрева и $6,5^{\circ}\text{C}$ по участкам остывания.

4.5 Расчет тепловых характеристик в циклических режимах работы

В настоящее время имеется два способа, позволяющих определять величину превышения температуры обмотки статора и связанную с ней допустимую нагрузку при циклическом режиме. Первый способ основан на моделировании циклической нагрузки с помощью динамической модели (см. параграф 3.3). Достоинством такого подхода является, во-первых, наглядное представление цикла нагрева остывания, во-вторых, возможность наблюдения температуры в нескольких элементах одновременно. Главный недостаток этого способа заключается в затруднениях по выявлению вклада составляющих потерь на участках цикла в общий нагрев обмотки. Для решения такой задачи приходится проводить множественные численные эксперименты, что не эффективно. Математическая модель и инструментарий моделирования был представлен в главе 3, в которой, в частности, приведен пример результата моделирования нагрева в цикле. Другой способ основан на использовании методов эквивалентного тока, момента, потерь [7, 229]. Применение такого способа не отражает процесс нагрева, но на основе их использования можно разработать методику, позволяющую рассчитывать установившееся значение температуры и определять вклад составляющих потерь на участке цикла в общий нагрев обмотки статора. Кроме того, такая методика позволя-

ет с наименьшими затратами определять допустимую мощность циклического режима. Основной недостаток предполагаемой методики заключается в том, что с ее помощью можно контролировать превышение температуры только в одном элементе, например, в обмотке статора.

В связи с разработанным в предыдущем параграфе качественным уточнением метода эквивалентных потерь возможно распространить полученные результаты на циклические режимы. Это можно выполнить с помощью некоторого усложнения расчета значения превышения температуры обмотки статора на основе представленной ниже методики [86], которая приведена в виде таблицы, см. таблицу 4.10.

Таблица 4.10. Формуляр методики расчета превышения температуры в циклических режимах

№ п/п	Режим 1 (основной, номинальный)		Режим k
	Наименование	Обозначение, формула	формула
1	Момент, Нм	M^H	M^k
2	Время работы, с	t^H	t^k
3	Мощность потерь в обмотке статора, Вт	$p_{CU1}^H = p_{CU1}^H$	$p_{CU1}^k = \left(\frac{M^k}{M^H} \right)^2 (p_{CU1}^H - p_{CU1}^{xx})$
4	Мощность потерь в обмотке ротора, Вт	$p_{CU2}^H = p_{CU2}^H$	$p_{CU2}^k = \left(\frac{M^k}{M^H} \right)^2 p_{CU2}^H$
5	Мощность магнитных потерь, Вт	$p_{FE}^H = p_{FE}^H$	$p_{FE}^k = f(p_{FE}^H)$
6	Мощность греющих потерь, Вт	$p_{ГР}^H = p_{CU1}^H + K_{CU2} \cdot p_{CU2}^H + K_{FE} \cdot p_{FE}^H$	$p_{ГР}^k = p_{CU1}^k + K_{CU2} \cdot p_{CU2}^k + K_{FE} \cdot p_{FE}^k$
7	Энергия, эквивалентная нагреву обмотки статора, Дж	$W_{ГР}^H = (1 + K_{Г})^2 \cdot p_{ГР}^H \cdot t^H$	$W_{ГР}^k = (1 + K_{Г})^2 \cdot p_{ГР}^k \cdot t^k$
8	Энергия цикла, идущая на нагрев обмотки статора, Дж	$W_{ГР} = \sum_i W_{ГР}^i$	
9	Средняя греющая мощность, рассеиваемая за цикл, Вт	$\langle p_{ГР} \rangle = W_{ГР} / \sum_i t_i$	
10	Среднее значение перегрева обмотки статора, °C	$\Theta_{CU1} = \frac{\langle p_{ГР} \rangle}{\langle p_{ГР}^{БАЗ} \rangle} \Theta_{CU1}^{БАЗ}$	

Сравнение результатов, рассчитанных с помощью представленной методики, и экспериментальных данных, полученных при ее практическом использовании, для расчета теплового режима электродвигателя лифтовой лебедки, показало удовлетворительный результат. Погрешность составила от 1 до 15 % (на ряде типоразмеров АЧ180М8 АЧ200L8, АЧ200LB, АЧ200LC8, АЧ200LD8), что лежит в пределах сервис-фактора электрической машины, а значит, допустимо. Расхождение расчетных и экспериментальных значений может быть объяснено тем, что метод эквивалентных греющих потерь больше подходит для исследования установившихся тепловых процессов, при которых его погрешность значительно меньше и не превышает 5%. В качестве примера в таблице 4.11 приведен расчет и данные опыта лифтовых двигателей.

Таблица 4.11. Данные верификации методики расчета превышения температуры в циклических режимах

		5АЧ200L8 400кг, 1м/с, 2:1, КВШ 400м				7АЧ200L8 400кг, 1,6м/с, 2:1, КВШ 320м			
		разгон	работа	торм.	пауза	разгон	работа	торм.	пауза
$M_{РЕЖ}$	Нм	480	420	260	0	451	320	180	0
$t_{РЕЖ}$	с	2	9	2	11	2	9	2	11
p_{CU1}	Вт	4095	3135	1201	0	3140	1581	500	0
p_{CU2}	Вт	659	505	0193	0	935	471	149	0
p_{FE}	Вт	36	36	36	0	59	59	59	0
$p_{ГР}$	Вт	4578	3510	1358	0	3830	1946	640	0
$W_{ГР}$	Дж	9156	31591	2716	0	7661	17515	1280	0
W_{Σ}	Дж	43463					26456		
$\langle p_{ГР} \rangle$	Вт	1811					1102		
$K_{Г}$		1,023					1,137		
$\langle p_{ГР} \rangle \cdot K_{Г}$		1895					1425		
$\Theta_{CU1}^{БАЗ}$	°C	50					52		
$p_{ГР}^{БАЗ}$		1015					1198		
Θ_{CU1}	°C	93,3	расчет				61,9	расчет	
		87	эксперимент				75,3	эксперимент	

Приведенный пример характеризует тепловые процессы в цикле работы частотно-регулируемого электродвигателя 5АЧ200L8 и 7АЧ200L8 привода безредукторной лифтовой лебедки с грузоподъемностью 400 кг, кратностью полиспада 2:1, диаметром КВШ 400мм и 320мм и скоростью перемещения ка-

бины 1м/с и 1,6м/с соответственно. Адаптация методики была проведена в соавторстве с О.В. Кругликовым [74] и вошла в материал его диссертации [125].

Необходимо отметить, что важным условием возможности применения данной методики является условие отсутствия резких адиабатических нагревов обмотки статора, которые соответствуют стоянкам под коротким замыканием и затяжным прямым пускам электродвигателей. Однако, такие режимы нехарактерны для исследуемой предметной области мехатронных систем.

Выводы по главе 4

1. Для энергетического анализа мехатронных систем предложена новая методика поверочного электромагнитного расчета. Методика позволяет вычислять точки скоростных характеристик, в частности, зависимости от частоты вращения: длительного момента – нагрузочной характеристики, максимального момента – перегрузочной характеристики, тока, напряжения, индукции в воздушном зазоре, мощности потерь в основных элементах электродвигателя, рассчитанные с учетом алгоритма управления магнитным потоком, ЭДС и другими параметрами электрической машины. Новый подход проработан для асинхронных и вентильно-индукторных электродвигателей, реализован в виде алгоритмов методик и расчетных программ для ЭВМ. Получил внедрение при энергетических расчетах и разработке силовых компонентов мехатронных систем со сложными механическими характеристиками, требующими оптимизации тока, потерь и других характеристик, выполняемых специалистами расчетно-теоретического сектора ПАО «НИПТИЭМ».

2. Уточнения, предложенные для метода эквивалентных греющих потерь, в значительной мере развивают его, расширяя применение на расчет превышения температур обмоток электрических машин, работающих с переменной частотой вращения. Уточнены и приведены формулы для вычисления зависимостей превышения температуры обмотки статора и предельной

нагрузки от частоты вращения для закрытых обдуваемых электродвигателей. На основе расчетно-экспериментальной методики, представленной в работе, найдены и приведены в тексте необходимые для расчета коэффициенты для закрытых обдуваемых общепромышленных двигателей производства ООО «ПК«ВЭМЗ», ПАО «НИПТИЭМ». Разработана прикладная программа расчета предельных нагрузочных характеристик закрытых обдуваемых двигателей, внедренная в практику проектирования ПАО «НИПТИЭМ», ООО «Русэлпром-Мехатроника», используемая с 2010 г., на основании которой определены параметры нагрузки при частотном регулировании для технических условий ТУ 16-13 на электродвигатели АДЧР с ВОВ 112-315мм, а также на электродвигатели серии 7AVE.

3. Разработанная упрощенная методика теплового расчета электродвигателей в повторно-кратковременных режимах работы, учитывающая алгоритмы управления на характерных участках циклограммы, позволяет ставить в соответствие величину превышения температуры обмотки статора каждому участку циклограммы. Это позволяет определять критические, с точки зрения энергетики, участки циклограммы и проводить перепроектирование системы с учетом этих данных. Новая методика была использована при оптимизации тепловых характеристик электродвигателей безредукторных лифтовых лебедок производства ПАО «НИПТИЭМ».

ГЛАВА 5. ОПТИМАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ

Согласование режимов электропитания и нагрузки двигателя - важный этап разработки мехатронной системы. При построении мехатронных систем с асинхронными и вентильно-индукторными двигателями эффективное преобразование энергии может быть получено только при корректно заданных параметрах питания, соответствующих нагрузке. Некорректно выбранный режим электропитания в мехатронной системе приведет к недогрузке или перегрузке двигателя, и проявится в увеличении потерь энергии в элементах машины. Возникновение режимов неравномерного момента и крутильных колебаний роторов электродвигателей также является следствием некорректного режима питания. Современные силовые полупроводниковые преобразователи частоты обеспечены хорошим уровнем защит от длительной и кратковременной перегрузки, повышенного напряжения и других критических режимов, но их система безопасности, в первую очередь, направлена на сохранение работоспособности собственного инвертора и выпрямителя. В мехатронной системе электродвигатель находится в подчиненном положении, его информационный ресурс ограничен минимальным набором датчиков, которые не предназначены для сигнализации некорректного режима электропитания. Поэтому эффективность преобразования энергии должна быть обеспечена алгоритмами управления режимом питания, разработанным на этапе проектирования мехатронной системы.

Функциональные зависимости критических характеристик электродвигателя, которые показывают эффективность преобразования энергии и надежность эксплуатации машины, должны быть отражены с помощью обобщенных критериев, на основе которых проводится разработка алгоритмов управления для мехатронной системы. Поиск оптимального режима электропитания соответствующего установленной нагрузке, к которому относится нахождение оптимального магнитного потока для асинхронного двигателя и угловой зависи-

мости фазного тока для вентильно-индукторного двигателя, имеет первый приоритет при разработке алгоритма управления моментом.

Оптимизация параметров электропитания связана и проводится одновременно с изменением обмоточных данных машины. Следует понимать, что оптимальный режим питания обеспечивает экстремум функционала на всей скоростной характеристике. В то время как за счет обмоточных данных можно обеспечить экстремум функционала лишь в одной точке скоростной характеристики, при этом влияние, в смысле масштабирования значений токов и напряжений, будет оказано и на другие ее участки.

5.1 Цели и критерии оптимизации

Цели, достижение которых преследуется при синтезе систем, в том числе мехатронных, как правило, связаны с фундаментальными техническими параметрами: энергосбережением, снижением массы и габаритов, материалосбережением, увеличением ресурса безотказной работы. Однако в большинстве случаев использование указанных целей в качестве критериев для оптимизации затруднено, поэтому разработчикам электромеханических и мехатронных систем необходимо вводить в качестве целевых функций их аналоги – функционалы, которые отражают стремление фундаментальных технических параметров к своим целям в фиксированных условиях.

Наибольшее влияние на фундаментальные технические параметры мехатронной системы оказывают соответствующие характеристики электромеханического преобразователя – двигателя или генератора. Поэтому оптимизация КПД, массы и габаритов, заготовительного объема материалов, необходимого для производства машины, ресурса изоляции обмоток имеет приоритет в оптимизации всей мехатронной системы.

При оптимальном проектировании электрических машин принято оптимизировать следующие параметры: себестоимость активной части, приведенные затраты на производство электродвигателя, объем какого-либо из активных элементов машины (материалов обмотки статора, магнитов ротора)

[2, 7, 27, 30, 88, 108, 215, 249, 270, 293]. Методы оптимального проектирования электрических машин развивались с середины 20 века и в целом проработаны и известны. При этом предполагается, что разработанный электродвигатель получает питание от идеальной сети переменного тока со стандартной амплитудой и частотой. В настоящее время методы оптимального проектирования электрических машин не предполагают их эксплуатацию с изменяемой частотой и амплитудой напряжения, следовательно, не адаптированы для разработки частотно-регулируемых двигателей.

Для применения известных методов оптимального проектирования электрических машин переменного тока первоначально необходимо решить задачу поиска оптимального режима электропитания для различных частот вращения. Решение таких задач при оптимизации алгоритмов управления магнитным потоком и частотой вращения ротора в целом проработаны [23, 131, 132, 177, 179, 217, 248, 253, 259, 291]. Однако рассматриваемые функционалы, как правило, ориентированы на цели, не связанные с надежностью электрических машин – разработчики алгоритмов минимизируют амплитуду тока, мощность потерь в обмотках статора, максимизируют быстродействие системы, точность поддержания частоты вращения. Кроме того, если проводить оптимизацию алгоритмов управления электропитанием без одновременного оптимального проектирования машины, невозможно достичь максимального результата. Проведение совместной оптимизации как машины, так и параметров питания возможно при использовании итерационной процедуры, при которой оптимальное проектирование машины проводится на основе известных методов [27, 65, 88, 108, 215].

5.2 Исследование оптимальных режимов асинхронного двигателя при частотном управлении

Задача разработки активной части частотно-регулируемого асинхронного электродвигателя, предназначенного для использования в мехатронной системе и требующего минимизации активных объемов, себестоимости, при-

веденных затрат и др., как правило, разбивается на две подзадачи:

1. Разработка геометрии активной части с оптимизацией главных размеров, пазовой геометрии и обмоточных данных при обеспечении заданных электромеханических характеристик в ряде точек механической характеристики.

2. Оптимизация параметров электропитания при неноминальной частоте вращения и произвольной нагрузке, например, в режимах пониженной или повышенной частоты вращения, перегрузки или частичной нагрузки.

Оптимизация параметров питания, как показывает практика, может быть направлена на три цели:

цель 1 – минимизация суммарной мощности потерь электродвигателя. Достижение цели позволяет обеспечить работу с максимально возможным коэффициентом полезного действия для имеющейся машины при установленных электромеханических параметрах вращения;

цель 2 – минимизация превышения температуры обмотки статора. Достижение цели позволяет обеспечить работу с максимальной надежностью обмотки статора для имеющейся машины при заданных электромеханических параметрах вращения и охлаждения машины;

цель 3 – минимизация превышения температуры обмотки ротора. Достижение цели позволяет обеспечить работу машины с максимальной надежностью подшипниковых узлов электрической машины при установленных электромеханических параметрах вращения и охлаждения.

В практике электропривода для оптимизации энергетических показателей с помощью параметров питания электродвигателя, работающего от преобразователя частоты с векторным управлением, как правило, используют следующие цели: минимум вектора тока, который позволяет работать с минимальным током статора; минимум суммарной мощности потерь, который позволяет работать при максимальном коэффициенте полезного действия.

Следует отметить, что при такой оптимизации, как правило, используются упрощенные модели электромеханических процессов машины, в том числе, без учета влияния магнитных потерь или с их значительными упроще-

ниями [23, 38, 131, 132, 169, 179, 228, 248]. С другой стороны, существует мнение, что достижение минимума суммарной мощности потерь автоматически ведет к минимизации тока статора, а также минимизирует перегрев обмоток. Как показала практика, данное утверждение справедливо при значительных допущениях и в ограниченной части диапазона частоты питания.

Как известно, основные потери энергии в электрической машине могут быть разделены на электрические, магнитные, механические и добавочные. При анализе наиболее простым является вычисление электрических потерь. Задача расчета магнитных потерь уже вызывает затруднения, а механические и добавочные потери сильно зависят от технологии производства электрических машин и поэтому определяются экспериментально с дальнейшей интерполяцией или экстраполяцией результатов в дальнейших расчетах. Однако основной вклад в суммарные потери и нагрев обмоток при использовании конкурентоспособных технологий производства электродвигателей вносят электрические и магнитные потери, кроме того, одинаковые электромеханические параметры вращения машины (n , M) могут быть получены с различными энергетическими характеристиками, то есть при различных значениях мощности электрических и магнитных потерь и соотношения между ними.

Для исследования зависимости функционалов от мощности потерь в основных элементах следует представить электрические и магнитные потери двигателя как функцию вспомогательного аргумента, в качестве которого целесообразно выбрать величину магнитных потерь $\hat{p}_{FE}$, которой предполагается варьировать. Таким образом, составляющие потерь могут быть приближенно вычислены в соответствии со следующими выражениями:

$$\begin{aligned} p_{CU1} &= K_{T1} \left[\left(p_{CU1}^{BA3} - 3R_1 (I_0^{BA3})^2 \right) \frac{\hat{p}_{FE}}{p_{FE}^{BA3}} + 3R_1 \left(I_0^{BA3} \frac{\hat{p}_{FE}}{p_{FE}^{BA3}} \right)^2 \right], \\ p_{CU2} &= K_{T2} p_{CU2}^{BA3} \frac{\hat{p}_{FE}}{p_{FE}^{BA3}}, \\ p_{FE} &= \hat{p}_{FE} \left(\frac{f}{f^{BA3}} \right)^{1,3}, \end{aligned} \quad (5.1)$$

где надстрочный индекс «^{БАЗ}» – относится к значениям, полученным при расчете базового (номинального) режима. Изменение величины активного сопротивления учитывается с помощью коэффициента:

$$K_{Ti} = \frac{1 + 0,004\Theta_{CUi}^{БАЗ} K_{\Theta i}}{1 + 0,004\Theta_{CUi}^{БАЗ}},$$

индекс $i=1$ обозначает принадлежность к статору; индекс $i=2$ принадлежность к ротору; $\Theta_{CUi}^{БАЗ}$ – превышение температуры обмотки статора или ротора; $K_{\Theta i}$ – относительное увеличение перегрева, вызванное изменением режима относительно режима с базовым превышением температуры обмотки. Для оценки погрешности предложенной формулы была проведена верификация результатов расчета составляющих потерь согласно выражениям (5.1) с результатами вычисления потерь в тех же режимах работы на основе методики поверочного электромагнитного расчета [158]. Анализ точности показал достаточную сходимость результатов в диапазоне изменения $\hat{p}_{FE}$ в пределах $1/5 \dots 3$ относительно базового значения. Основным источником погрешности при вычислении потерь с помощью выражений (5.1) связан с «аномальным» увеличением магнитных потерь, которое возникает при значительной величине магнитной индукции в ярме статора и объясняется вытеснением магнитного потока из ярма в станину. Этот эффект будет рассмотрен в главе 6.

Функционал, используемый для минимизации суммарной мощности потерь, может быть представлен в виде:

$$F_1 = p_{\Sigma} = p_{CU1} + p_{CU2} + p_{FE}. \quad (5.2)$$

Функционалы, используемые для минимизации величины превышения температуры обмотки статора F_1 и ротора F_2 асинхронного двигателя, могут быть получены на основе метода греющих потерь [7, 73] при принятии равной единице величины эквивалентного теплового сопротивления и имеют вид:

$$F_2 = p_{CU1} + K_{CU2} p_{CU2} + K_{FE} p_{FE}, \quad (5.3)$$

$$F_3 = K_{CU1} p_{CU1} + p_{CU2} + K_{FE2} p_{FE}, \quad (5.4)$$

где K_{CU2} , K_{CU1} , K_{FE} , K_{FE2} – коэффициенты влияния составляющих потерь, которые могут быть приняты равными: $K_{CU2}=0,7$; $K_{FE}=0,6$; $K_{CU1}=0,7$; $K_{FE2}=0,5$.

Аргумент $\hat{p}_{FE}$, связывающий потери в основных элементах асинхронной машины, пропорционален квадрату напряжения при постоянстве частоты, т.е. $\hat{p}_{FE} = K \cdot U_1^2$, однако он малоинформативен. Общепринятой характеристикой соотношения потерь, которая может быть использована в расчетах, является коэффициент потерь, характеризующий относительную величину постоянных потерь в полных потерях [40, 73]:

$$K_0 = \frac{P_{FE}}{P_{CU1} + P_{CU2} + P_{FE}},$$

однако вследствие нелинейной зависимости величины магнитных потерь от частоты питания, применять его при анализе функционалов на различных частотах нецелесообразно. Адекватно отразить параметры питания электродвигателя для поиска функционала возможно с помощью относительной величины тока идеального холостого хода:

$$K_{I0} = \frac{I_0}{I_{0}^{БАЗ}},$$

где $I_0^{БАЗ}$ – ток идеального холостого хода в базовом (номинальном) режиме. Очевидно, что увеличенный поток будет соответствовать завышенному значению коэффициента $K_{I0} > 1$, сниженный поток – заниженному значению $K_{I0} < 1$. Следует отметить, что в задачах оптимизации обмоточных данных и параметров питания целесообразно использование обоих коэффициентов в качестве аргумента, связывающего составляющие потерь, однако необходимо отметить нелинейную зависимость между параметрами K_{I0} и K_0 , $\hat{p}_{FE}$ и K_0 . На рис. 5.1 приведена зависимость исследуемых функционалов от аргументов K_0 и K_{I0} , полученных для специального электродвигателя производства ПАО «НИПТИЭМ» с ВОВ 280мм, номинальной мощностью $P_2=186$ кВт, $U_H=297$ В, $f_H=86$ Гц. Следует указать, что величина $F_2^Б$ соответствует минимуму целевой функции, характеризующему минимально возможное превыше-

ние температуры обмотки статора, т. е., $F_2^B = \min(F_2)$, и определяет режим, при котором: $p_{CU1}=2540\text{Вт}$; $p_{CU2}= 1353\text{Вт}$; $p_{FE1}=4360\text{Вт}$.

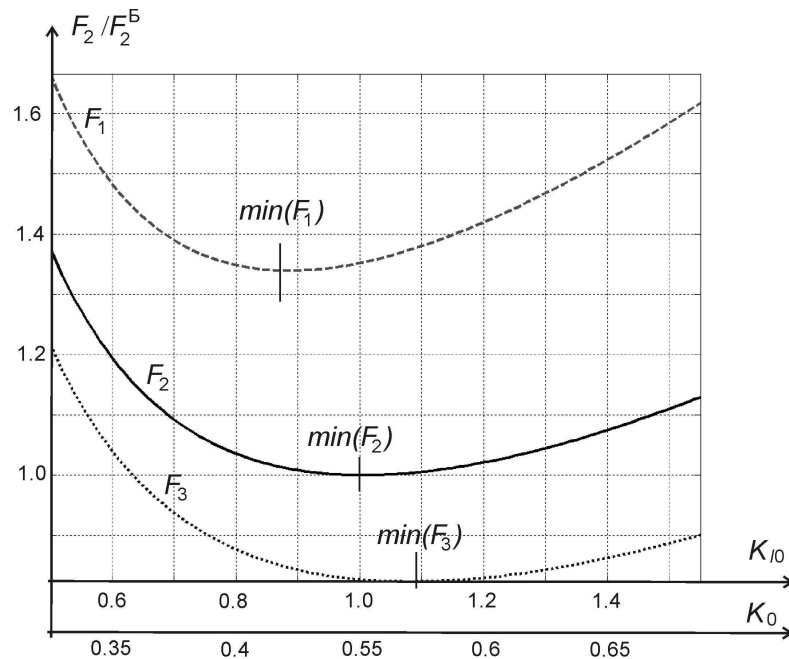


Рис. 5.1. Зависимость относительного превышения температуры от относительной величины тока холостого хода и коэффициента потерь при номинальной частоте питания

На рис. 5.2, рис. 5.3 приведены аналогичные зависимости, полученные для того же электродвигателя при половинной и двойной частоте питания.

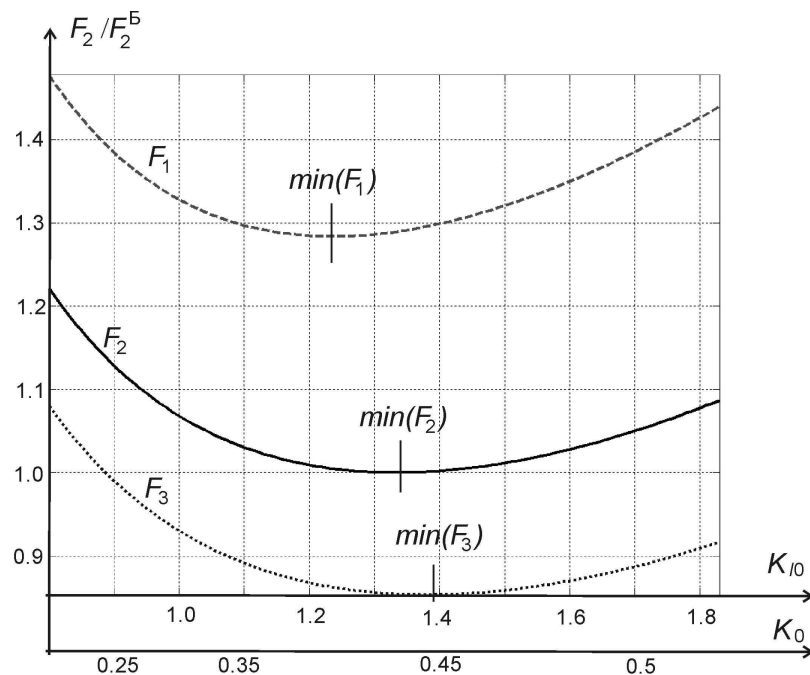


Рис. 5.2. Зависимость относительного превышения температуры от относительной величины тока холостого хода и коэффициента потерь при половинной частоте питания

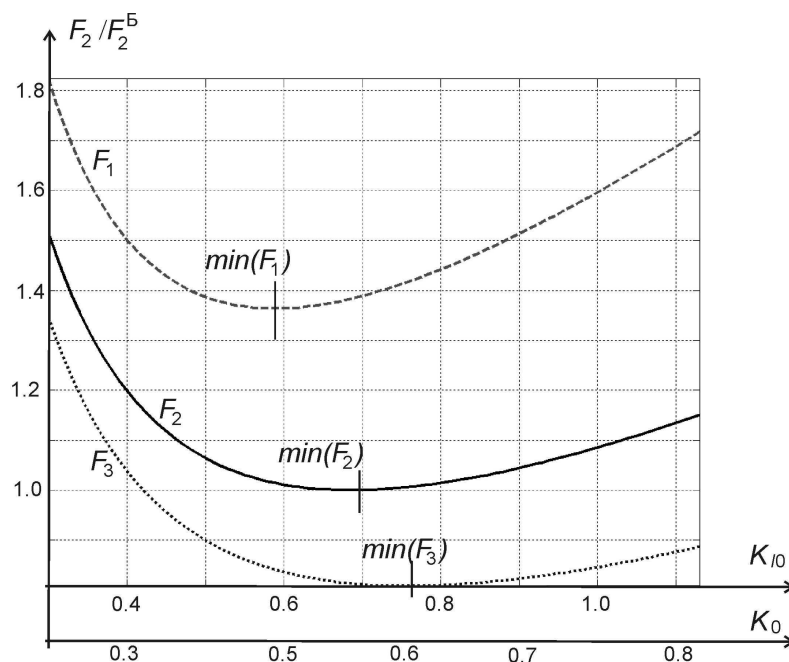


Рис. 5.3. Зависимость относительного превышения температуры от относительной величины тока холостого хода и коэффициента потерь при двойной частоте питания

Анализ представленных зависимостей показывает:

1. Минимумы функционалов F_1 , F_2 , F_3 соответствуют различным значениям коэффициентов K_{I0} и K_0 , следовательно, получаются при различных соотношениях между потерями и различных значениях магнитного потока, а значит, и параметрах питания.

2. Минимизация функционала F_1 приводит к проигрышу по $\Delta F_2 = 1,5\%$, что соответствует равнозначному увеличению превышения температуры обмотки статора. Относительно минимума ΔF_3 проигрыш составляет 2%. Если учесть погрешность в определении минимума потерь в 1%, то проигрыш ΔF_2 составит от 4% до 0 %, проигрыш ΔF_3 – от 7% до 0,5%.

3. С уменьшением частоты питания минимум функционалов достигается при больших значениях тока намагничивания, с увеличением – при меньших. Кроме того, при увеличении частоты вращения разница между параметрами, при которых получаются значения максимумов $K_{I0}(F_1)$, $K_{I0}(F_2)$, $K_{I0}(F_3)$ и $K_0(F_1)$, $K_0(F_2)$, $K_0(F_3)$, увеличивается.

Особый интерес представляют зависимости коэффициентов K_{I0} и K_0 от частоты питания, найденные для соответствующих целей и представляющих

эти цели функционалов. Эти зависимости приведены на рис. 5.4а, рис. 5.4б соответственно.

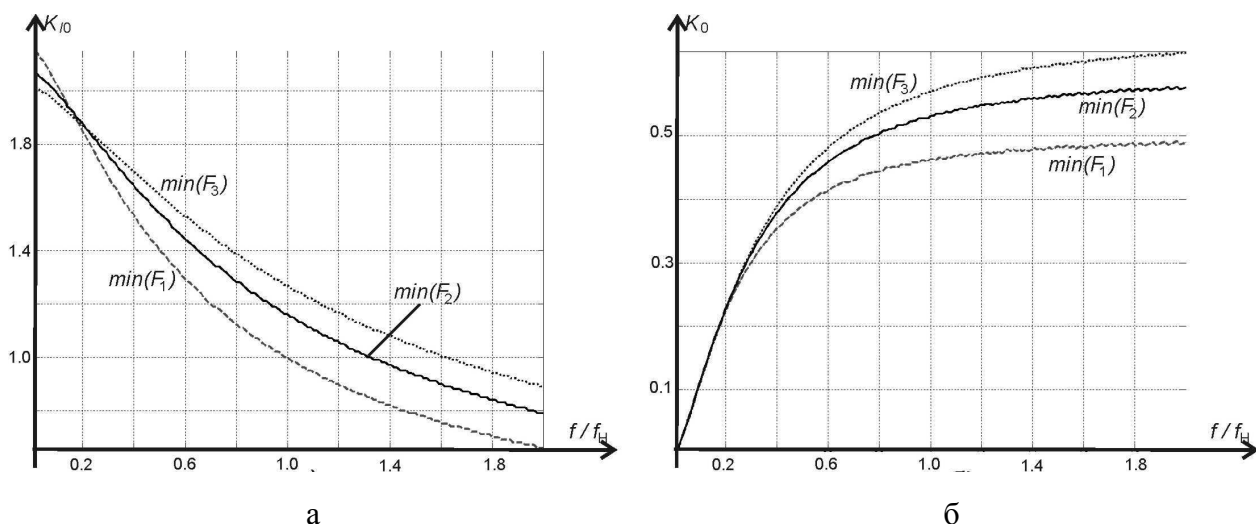


Рис. 5.4. Зависимость исследуемых коэффициентов, характеризующих питание – K_{10} и потери – K_0 , от относительной частоты питания при различных целях оптимизации

Анализ графических зависимостей позволяет распространить сделанные ранее выводы на частотную область $(0, 2 \dots 2) \cdot f_H$, кроме того, свидетельствует об оправданном увеличении магнитного потока машины в области низких частот питания, так как это не сопровождается доминирующим увеличением магнитных потерь, а увеличение намагничивающей составляющей тока статора незначительно снижает эффект уменьшения электрических потерь от минимизации рабочей составляющей тока. Кроме того, на средних и высоких частотах питания, относительно номинальной, различия в значении тока намагничивания, а следовательно, и потока, соответствующего разным целям, становятся более заметными и не могут быть проигнорированы.

В настоящее время подавляющее большинство частотно-регулируемых электроприводов переменного тока строятся с использованием общепромышленных асинхронных электродвигателей или их модификаций, при которых параметры активных частей, в том числе обмоточные данные, не изменяются. В связи с этим интересно поведение представленных функционалов для общепромышленных асинхронных электродвигателей и соотношение их минимумов с точкой номинальных параметров питания. На рис. 5.5 при-

ведены зависимости целевых функций от коэффициентов K_{I0} и K_0 для общепромышленного электродвигателя 5AM315MB2. Линией, обозначенной « U_H », показано значение аргументов при номинальных параметрах питания.

Как видно из графика, минимумы функционалов лежат значительно правее, чем значения аргументов K_{I0} и K_0 , соответствующих номинальным параметрам питания, т.е. для оптимизации режима работы по любой из представленных целевых функций необходимо питать обмотку машины напряжением с большей амплитудой. Это объясняется тем, что серийные электродвигатели должны соответствовать ГОСТ 28327-89 в части кратностей пускового тока и кажущейся мощности, ограничения по которым не позволяют достигнуть минимумов F_1 , F_2 , F_3 при их проектировании.

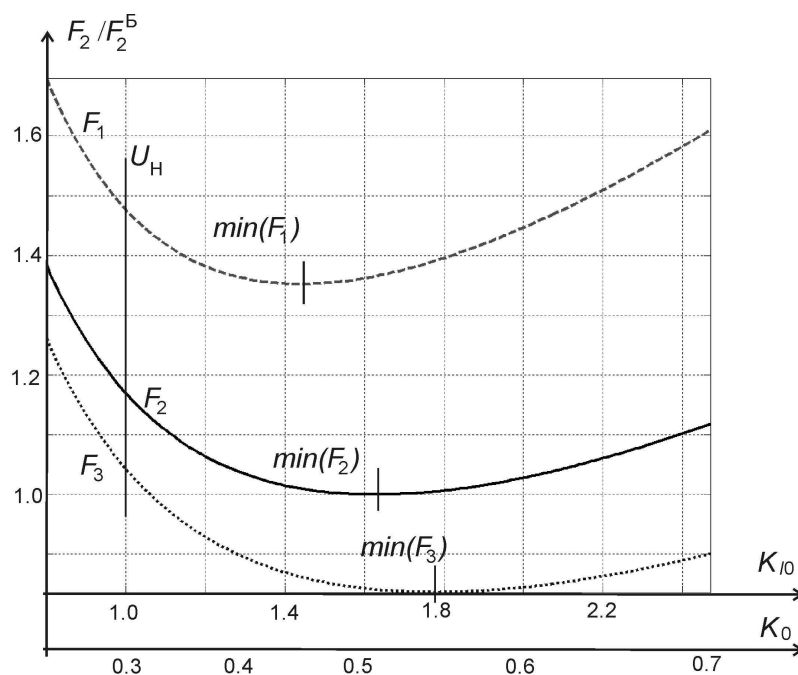


Рис. 5.5. Зависимость относительного превышения температуры от относительного значения тока холостого хода и коэффициента потерь при номинальной частоте питания, полученная для двигателя 5AM315MB2

Большинство серийно изготавливаемых преобразователей частоты не только не позволяют обеспечить повышенное значение напряжения на номинальной частоте (380В, 50Гц), но и не обеспечивают номинального, измеренные значения максимальной величины действующего значения линейного напряжения лежат в области 350-360В. С учетом того, что не всегда возможно применять электродвигатели с оптимизированными под реальное значение

напряжения обмоточными данными, имеет смысл использовать подход, суть которого заключается в увеличении потока за счет снижения номинальной частоты при сохранении амплитуды напряжения (см. параграф 2.2).

Таким образом, на основании проведенных исследований были получены результаты, которые могут быть сформулированы в виде следующих выводов:

1. При оптимизации энергетических показателей электродвигателей необходимо учитывать магнитные потери, так как они существенным образом влияют на положение минимумов целевых функций.

2. Возможна оптимизация энергетических режимов, минимизирующая только один из трех функционалов: минимум суммарной мощности потерь, минимум превышения температуры обмотки статора, минимум превышения температуры ротора.

3. Минимизация функционала, характеризующего минимум суммарной мощности потерь в общем случае, не обеспечивает минимизацию превышения температуры обмоток статора и ротора.

4. Общепромышленные асинхронные электродвигатели разрабатываются таким образом, чтобы обеспечить допустимую кратность пускового тока, что не позволяет минимизировать ни один из функционалов.

5. Минимизация функционалов при использовании общепромышленных двигателей возможна за счет использования большего потока, чем его номинальное значение, то есть за счет снижения частоты при номинальной амплитуде напряжения.

Оптимизацию параметров питания асинхронного электродвигателя в заданном режиме следует проводить в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Выбрать цель оптимизации: минимум потерь F_1 , минимальный нагрев обмотки статора F_2 , минимальный нагрев обмотки ротора F_3 .

2. Рассчитать номинальный режим работы электродвигателя в методике поверочного расчета и задать его параметры в уравнении модели (5.1). Найти минимум для заданного функционала выбранной цели по модели (5.1) любым способом безусловной одномерной оптимизации.

3. Вычислить для найденной точки минимума функционала значение тока холостого хода I_0 . По характеристике $B_D(I_0)$ найти значение магнитного потока B_D , являющееся первым приближением значения оптимального магнитного потока.

4. Используя алгоритм по рис. 4.2, найти параметры питания (U_1 , f_1), мощности составляющих потерь p_{CU1} , p_{CU2} , p_{FE} и ток холостого хода I_0 .

5. Уточнить нахождение минимума функционала для заданной цели, используя п.2-4, или любой алгоритм одномерной безусловной оптимизации при выборе в качестве варьируемой переменной B_D на основе алгоритма по рис. 4.2. Остановиться при достижении необходимой точности. Направление поиска следует выбирать от большего значения B_D к меньшему.

При оптимизации необходимо контролировать значение величины индукции в ярме статора, в случае ее увеличения выше 1,55Тл, следует учитывать добавочные потери холостого хода, возникающие в оболочке, см. параграф 6.1.

Ситуацию, при которой полученное оптимальное значение напряжения превышает свое ограничение, следует характеризовать как переход во вторую зону механической характеристики, в которой оптимизация не проводится.

Остановимся на следующем вопросе – обеспечение режима работы асинхронного электродвигателя без резонансов.

Повышение требований, предъявляемых мировым сообществом к энергоэффективности электрических машин малой и средней мощности 0,75-110 кВт [52], заставляет снижать активные сопротивления обмоток ротора и статора. При этом требования к повышенным пусковым характеристикам приводят к необходимости применять двухклеточные обмотки роторов, что в свою очередь увеличивает индуктивное сопротивление рассеяния ротора. Таким образом, на большинстве машин с ВОВ более 250мм электромагнитная постоянная времени $T_\Theta = \frac{1}{2\pi f_1 s_K}$, равна, а иногда больше четверти механиче-

ской постоянной времени $T_M = \frac{J\Delta\Omega}{\Delta M}$, где s_K – критическое скольжение. Это обуславливает хорошо известные в теории электропривода переменного тока колебания момента и скорости [20, 149, 230, 232, 234, 284]. Особенностью такого рода колебаний является зависимость их затухания от температурного состояния электродвигателя, нагрев в процессе эксплуатации снижает их проявления. Как правило, на прогретых машинах они не наблюдаются. Кроме того, увеличение момента инерции ротора за счет присоединения к валу двигателя дополнительных масс также способствует их ускоренному затуханию.

Разработчик электродвигателя не может принять меры по устранению колебаний момента, так как увеличение сопротивления обмотки снижает эффективность преобразования энергии в машине. Поэтому его роль сводится к установлению границ резонансных колебаний для разрабатываемой машины. Эти границы следует указывать в ТУ на регулируемые электродвигатели. Современные преобразователи, как правило, оснащены специальными алгоритмами, исключающими возникновение данных колебаний, кроме того, в системах с векторными регуляторами момента и частоты вращения такие колебания не проявляются.

Предлагаемые формулы для расчета границ резонансных колебаний, как показывает практика, имеют демонстрационное назначение [284], дают неточный результат или очень сложны в использовании [20]. Поэтому для определения параметров колебаний такого типа и своевременной борьбы с ними необходимо применять математическое моделирование [149]. При моделировании следует учитывать нелинейность параметров асинхронного электродвигателя и потери напряжения в инверторе.

На рис. 5.6, рис. 5.7 приведены временные диаграммы пуска двигателя 5A225M4 в составе асинхронного частотно-регулируемого электропривода, иллюстрирующие появление резонансных колебаний в условиях холостого хода без дополнительного момента и их отсутствие в системе с дополнительным моментом инерции.

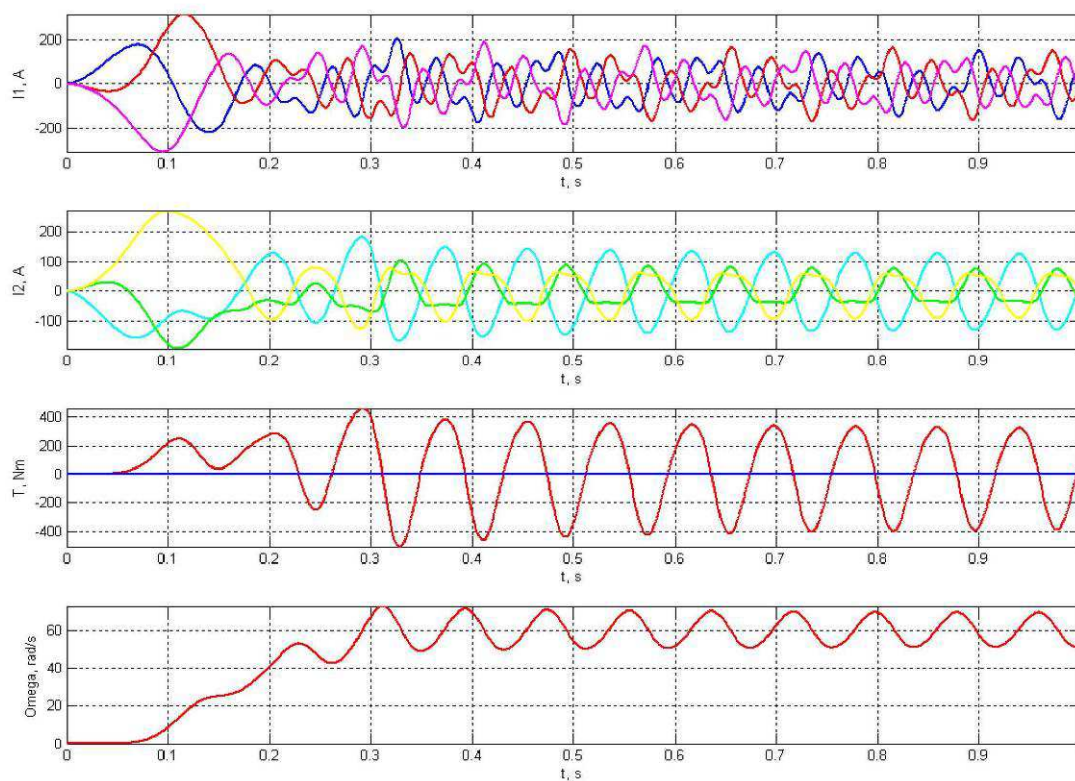


Рис. 5.6. Временные диаграммы в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе при питании двигателя частотой 20Гц на холостом ходу без дополнительного момента инерции

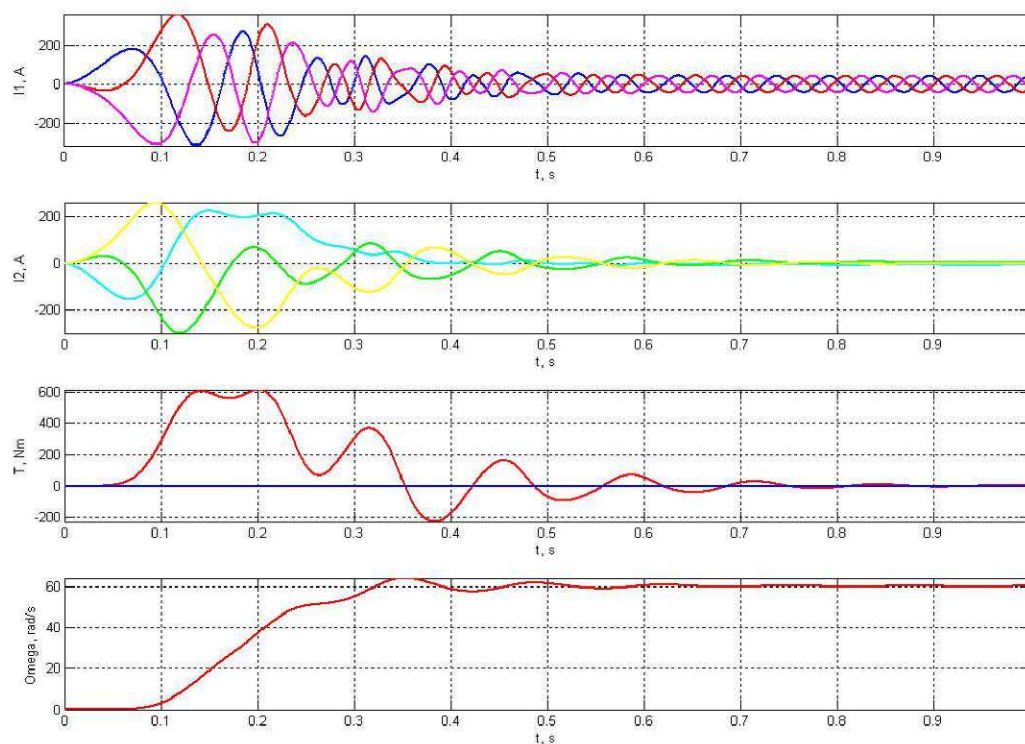


Рис. 5.7. Временные диаграммы в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе при питании двигателя частотой 20Гц на холостом ходу с дополнительным моментом инерции

В рамках работы было проведено исследование, в котором были определены границы резонансных колебаний момента для электродвигателей с ВОВ 225-315мм, выпускаемых заводом ООО «ПК «ВЭМЗ». Полученные значения были проверены экспериментально на площадке приемо-сдаточных испытаний ООО «ВЭМЗ-Спектр». Результаты исследования сведены в таблицу 5.1.

Таблица 5.1. Частота резонансов общепромышленных АЭД серии 5А(АИР)

ВОВ, мм	$2p$	Частота возникновения резонансов, Гц	Частота максимума резонанса, Гц	Частота пропадания резонанса, Гц
315	2	7	9,5	11
	4	8	10	14
	6	10	12,5	17
	8	11	12,5	18
280	2	8,5	9,5	12,5
	4	8,5	9,5	14
	6	9,0	11	17
	8	10,5	12	18
250	2	11	12,5	14,5
	4	13	17	23
	6	14	18	24
	8	-	-	-
225	2	13	15	18
	4	16	20	25
	6	-	-	-
	8	-	-	-

5.3 Исследование оптимальных режимов вентильно-индукторных электродвигателей

Основной задачей, решаемой при синтезе мехатронных систем с вентильно-индукторными двигателями, является нахождение зависимости фазного тока от угловой координаты ротора, такой, что, во-первых, обеспечивает минимизацию пульсаций момента электродвигателя, а во-вторых, обеспечивает экстремум какого-либо функционала. Указанный функционал может характеризовать различные цели, например: минимизировать величину фазного тока, амплитуду фазного напряжения, потери в обмотках. Следует отметить,

что сложный нелинейный характер временных и угловых зависимостей фазных токов, напряжений, потокосцеплений вентильно-индукторного электродвигателя существенно усложняет задачу оптимизации целевых функций. Поэтому для ее решения необходимо решать задачу не статической оптимизации, как в случае асинхронного электродвигателя, а динамической оптимизации с учетом ограничений, накладываемых на переменные модели, характеризующие ресурсы мехатронной системы [143, 151, 169, 262].

Поясним выбор управляющего воздействия, целевых функций, а также ограничений переменных.

В качестве управляющего воздействия можно выбирать следующие величины: фазное напряжение, фазный ток, сумма фазных токов в комплексе с углами проводимости фазы. Фактически управляющим воздействием всегда является напряжение, причем значение напряжения может принимать значение из множества $\{U, 0, -U\}$, где U – номинальное значение напряжения, прикладываемого к фазе, например, среднее значение напряжения звена постоянного тока силового преобразователя мехатронной системы. При этом, как было сказано в параграфе 4.3, способ управления, основанный на использовании нелинейного токового управления [135, 247], суть которого заключается в коммутации напряжения в фазе ВИД таким образом, чтобы мгновенное значение тока в фазе было близко к заданному – расчетному, обеспечивающему равномерный заданный момент, фактически упрощает задачу, переходя от недифференцируемой функции напряжения $u(t) \in \{U, 0, -U\}$ к дифференцируемой функции тока $i(t)$ и функции задания тока $I_3(\gamma)$. При этом, как выше отмечалось, нелинейное токовое управление может осуществляться как совместно в нескольких фазах, «отрабатывая» сумму фазных токов, так и в каждой фазе отдельно. Вопрос выбора между совместным и раздельным токовым управлением не принципиален, так как влияет только на техническую реализацию управления контурами тока мехатронной системы.

Функционал должен содержать интегральную величину потерь в вентильно-индукторном двигателе и оценку неравномерности суммарного элек-

ромагнитного момента. Однако если перенести оценку неравномерности момента в ограничения, то функционал значительно упростится и примет вид выражения:

$$J = \int_t^{t+T} \sum_{k=1}^m i_k^2 dt, \quad (5.5)$$

примем $t = 0$, T – период преобразования. При этом ограничения, накладываемые на неравномерность момента, можно представить в виде неравенства:

$$\left| M_C - \sum_{k=1}^m M_k \right| \leq \Delta_M, \quad (5.6)$$

где $M_C = \text{const}$ – момент нагрузки, которая принимается постоянной в течение периода; $\Delta_M = M_{\text{МАКС}} - M_{\text{МИН}}$ – ограничение неравномерности момента $\Delta_M \rightarrow 0$; $M_{\text{МАКС}}$ – максимальное значение выходного момента; $M_{\text{МИН}}$ – минимальное значение выходного момента; M_k – момент k -ой фазы, вычисляемый с помощью выражения (3.16).

Ограничение установленной мощности силового преобразователя можно представить как ограничение тока и напряжения фазы:

$$0 \leq i_k \leq I_{\text{МАКС}}; \quad |U_k| \leq U_{\text{МАКС}},$$

где $I_{\text{МАКС}}$ – максимально допустимое значение тока фазы. Ограничение производной тока по времени необходимо представить как функцию частоты вращения и момента нагрузки, учитывающей напряжение звена постоянного тока:

$$\frac{di_k}{dt} \leq \left(U - i_k R - z_R \frac{\partial \Psi_k}{\partial \gamma} \Omega \right) \cdot \left(\frac{\partial \Psi_k}{\partial i_k} \right)^{-1}, \quad (5.7)$$

Неравенство (5.7) может быть получено из первого уравнения системы (3.15) вычитанием из левой части величины $\Delta u \rightarrow 0$.

Таким образом, задача оптимизации может быть представлена в виде:

$$I(i_1, \dots, i_m) \rightarrow \min_{i_1, \dots, i_m} J, \quad (5.8)$$

с функционалом (5.5) и ограничениями (5.6), (5.7).

С целью упрощения задачи, проведем ограничение области определения, для этого рассмотрим отрезок времени $[0; T]$ и соответствующий этому отрезку времени отрезок изменения координаты $[0; 360]$ электрических градусов –

период коммутации. В силу периодичности функций $M_k(\gamma)$, показанных на рис. 5.8, задачу можно ограничить рассмотрением функций $M^1(\gamma) = M_1(\gamma)$ и $M^2(\gamma) = M_2(\gamma)$, где $M_1, M_2, M_3, M_4, \dots$ - моменты фаз $A, B, C, D, \dots$ на интервале $[90; 180]$ электрических градусов. С граничными условиями:

$$M^1(90) = M_C; \quad M^1(180) = 0; \quad M^2(90) = 0; \quad M^2(180) = M_C. \quad (5.9)$$

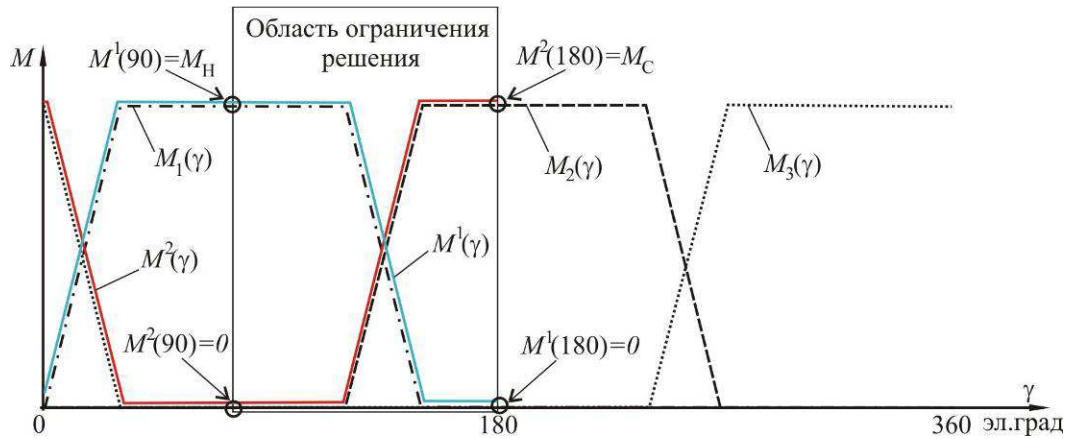


Рис. 5.8. Графическая интерпретация преобразования и ограничения задачи

Для решения задачи представим функцию угловой координаты в виде вектора размерностью n : $\gamma = [\gamma_1, \dots, \gamma_n]^T$, моменты фаз в виде векторов: $\mathbf{M}^1 = [M_1^1, \dots, M_n^1]^T$; $\mathbf{M}^2 = [M_n - M_1^1, \dots, M_n - M_n^1]^T$, токи фаз в виде векторов: $\mathbf{i}^1 = [i_1^1, \dots, i_n^1]^T$; $\mathbf{i}^2 = [i_2^1, \dots, i_n^2]^T$, при этом каждый элемент $i_i^k = f(M_i^k, \gamma_i, \Delta_M)$ векторов $\mathbf{i}^k$ — это численное решение скалярного уравнения:

$$M_i^k(\gamma_i, i_i^k) - M_C = 0, \quad (5.10)$$

с абсолютным значением невязки меньше величины Δ_M . В результате чего оптимизационная задача примет вид:

$$I(i_1, i_2) = \min_{i^1, i^2 \in R^n} J, \quad (5.11)$$

с функционалом, равным:

$$J = \|\mathbf{i}^1\|_2 + \|\mathbf{i}^2\|_2, \quad (5.12)$$

и ограничениями, накладываемыми на компоненты вектора:

$$i_i^k \leq I_{\text{МАКС}}; \quad u_i^k \leq U_{\text{МАКС}}, \quad (5.13)$$

$$i_i^k \leq i_{i-1}^k + h \left(U - i_{i-1}^k r - \frac{\partial \Psi_{i-1}^k}{\partial \gamma} z_R \Omega \right) \cdot \left(\frac{\partial \Psi_{i-1}^k}{\partial i_{i-1}^k} z_R \Omega \right)^{-1}, \quad (5.14)$$

где $h = \gamma_i - \gamma_{i-1}$.

Таким образом, задача сводится к отысканию векторов $\mathbf{i}^1$ и $\mathbf{i}^2$, удовлетворяющих условиям (5.10) - (5.14). Наиболее подходящим методом решения указанной задачи является дискретное программирование [103, 105]. На рис. 5.9 - рис. 5.12 приведены результаты моделирования установившегося режима в мехатронной системе с ВИД при использовании оптимальной зависимости фазного тока в соответствии с (5.10) - (5.14), рассчитанной методом дискретного программирования для нескольких значений нагрузки и частоты вращения [140, 143].

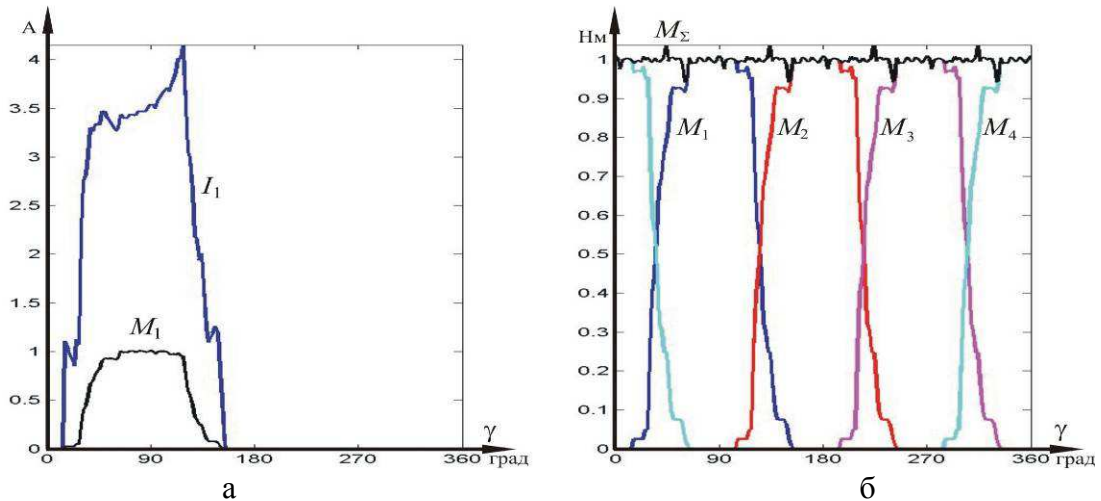


Рис. 5.9. Оптимальный ток и момент ВИД при $n=500$ об/мин, $M_C=1$ Нм:
а – ток и момент в фазе; б – суммарный электромагнитный момент

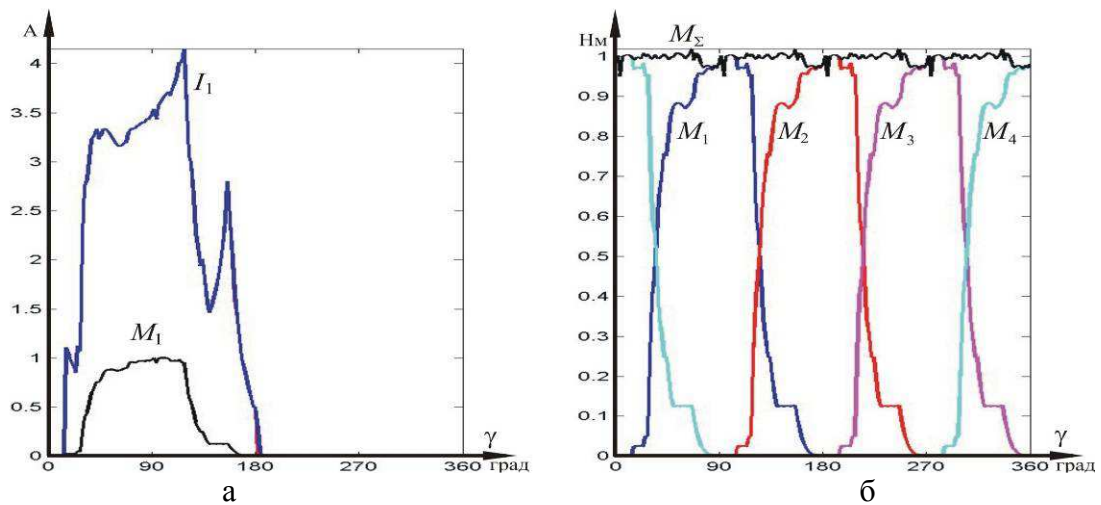


Рис. 5.10. Оптимальный ток и момент ВИД при $n=1000$ об/мин, $M_C=1$ Нм:
а – ток и момент в фазе; б – суммарный электромагнитный момент

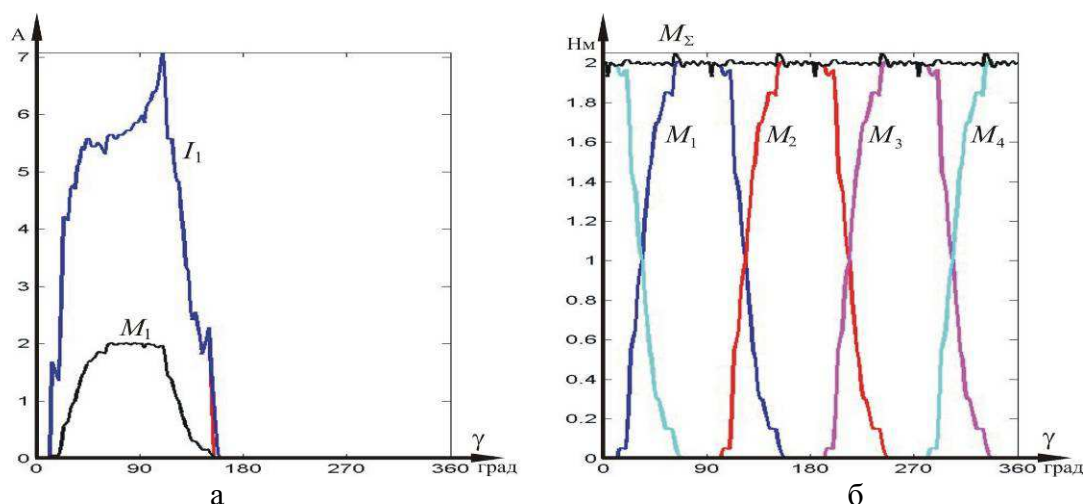


Рис. 5.11. Оптимальный ток и момент ВИД при $n=500$ об/мин, $M_C=2$ Нм:
а – ток и момент в фазе; б – суммарный электромагнитный момент

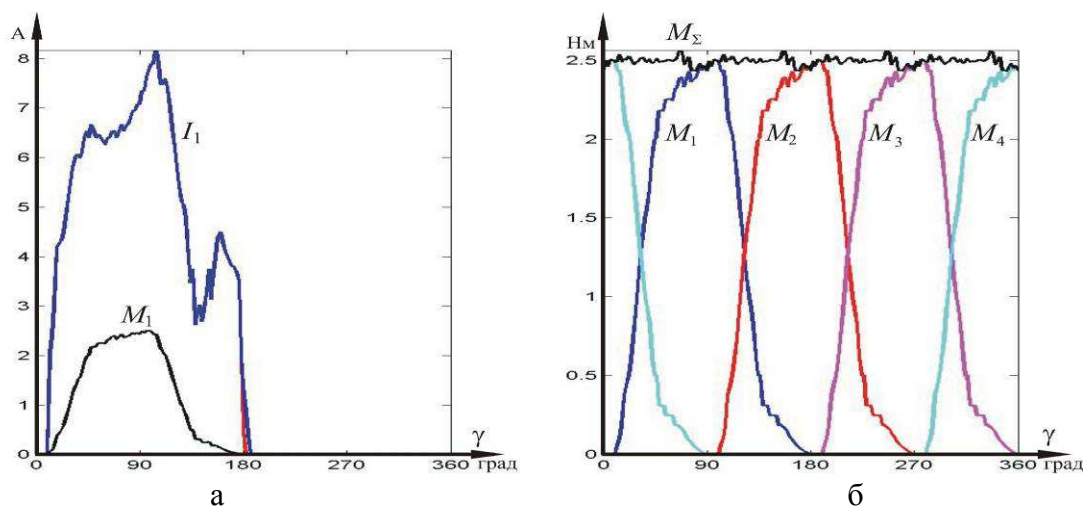


Рис. 5.12. Оптимальный ток и момент ВИД при $n=1000$ об/мин, $M_C=2$ Нм:
а – ток и момент в фазе; б – суммарный электромагнитный момент

Результаты получены для мехатронной системы со структурой, соответствующей рис. 1.7, вентильно-индукторный двигатель которой имеет следующие параметры [136]: число фаз $m=4$, тип конструкции 8×10 , внешний диаметр сердечника статора $Da1=131$ мм, диаметр расточки статора $Di1=86$ мм, длина активной части $L_1=20$ мм, скос паза ротора по длине $4,5$ градуса, напряжение звена постоянного тока $U=U_{DC}=300$ В.

Приведенные результаты моделирования подтверждают возможность расчета оптимальной зависимости тока от угловой координаты методом динамического программирования. При этом, неравномерность выходного момента составляет в соответствии с (4.2) величину $k_H=0,04$, что приемлемо для технических систем. Полученное значение неравномерности момента

подтвердило предположение о том, что дискретность примененного метода не будет влиять на адекватность решения.

В дополнение к приведенным результатам следует отметить, что возможно значительно ускорить процесс нахождения решения при незначительном снижении точности за счет представления решений уравнения (5.10) для различных нагрузок в виде двумерной аппроксимации $I_3(\gamma, M_C)$ на основе B -формы кубического сплайна.

Таким образом, исследования показали, что оптимизация зависимости тока от угловой координаты для вентильно-индукторного электродвигателя позволяет получить оптимальные с точки зрения неравномерности момента и потерь зависимости $I_3(\gamma)$. Однако характер этих зависимостей сложный, нелинейный и не может быть описан с помощью простых функций, несложных гармонических рядов и.т.д. Кроме того, полученные функции задания по току $I_3(\gamma)$ зависят от частоты вращения и нагрузки, а значит, являются функцией трех переменных $I_3(\gamma, \Omega, M_C)$. Это затрудняет техническую реализацию алгоритмов управления для таких мехатронных систем. Анализ результатов расчета электромеханических характеристик показал, что применение нелинейного токового управления вообще, и в частности с оптимальными зависимостями тока от угловой координаты, улучшает качественные показатели выходного момента, однако снижает выходную мощность вентильно-индукторного двигателя в сравнении с максимально возможной, при заданных ограничениях на ток и напряжение. Поэтому применять системы управления с оптимальными зависимостями тока от угловой координаты следует в комплексе с нелинейным токовым управлением, классическим широтно-импульсным и одноимпульсным управлением. При этом на механической характеристике системы с классическим (широтно-импульсным и одноимпульсным) управлением появляются режимы равномерного и квазиравномерного момента. Механическая характеристика ВИД с такой системой управления показана на рис. 5.13.

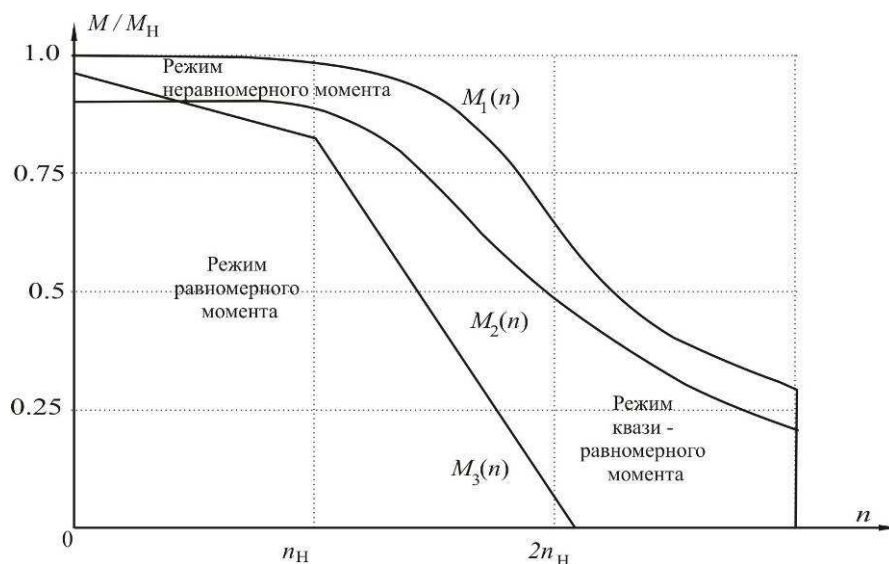


Рис. 5.13. Предельная механическая характеристика ВИД:

$M_1(n)$ - предельная механическая характеристика при классическом управлении;

$M_2(n)$ - предельная механическая характеристика при нелинейном токовом управлении;

$M_3(n)$ - предельная механическая характеристика при нелинейном токовом управлении с оптимальной зависимостью тока от угловой координаты

Соотношения механических характеристик, приведенных на рис. 5.13, показывают, что нелинейное токовое управление, в том числе с оптимальными зависимостями тока от угловой координаты, в мехатронных системах с вентильно-индукторными двигателями является не альтернативой классическому управлению, а лишь дополняет его режимом работы с равномерным моментом.

Полученные результаты расширяют положения нелинейного токового управления вентильно-индукторным двигателем, полученные в соавторстве с В.А. Шабаевым и С.И. Малафеевым и изложенные в работах [135, 221-223].

Для исследования характеристик систем с нелинейным токовым управлением были проведены вычислительные эксперименты, в ходе которых для различных конструкций вентильно-индукторных электродвигателей выполнялся расчет оптимальной зависимости тока от угловой координаты, исследовались электромеханические характеристики, изменялась радиальная геометрия активной части, далее расчеты повторялись. Последующий анализ результатов вычислительных экспериментов позволил сформулировать основные положения нелинейного токового управления для мехатронных систем с вентильно-индукторными двигателями.

1. Неравномерность момента может быть вызвана различными причинами (технологические погрешности изготовления, нестабильность напряжения на выходе звена постоянного тока и др.). Нелинейное токовое управление позволяет уменьшить неравномерность момента, вызванную физическими особенностями функционирования вентильно-индукторного двигателя (нелинейный характер момента в функции угловой координаты).

2. Минимизация неравномерности момента всегда связана с уменьшением величины пульсаций момента на отдельных участках периода преобразования, поэтому в системах с ограниченными ресурсами она ведет к снижению среднего момента и, следовательно, мощности.

3. Минимизировать неравномерность момента возможно до конечного значения Δ_M .

4. Минимизация неравномерности момента возможна только в машинах, имеющих значительное перекрытие моментных зон соседних фаз $\gamma_{\text{пм}} \geq 60^\circ$, которое определяется выражением:

$$\gamma_{\text{пм}} = \gamma_{\text{м}} - \frac{360}{m},$$

где $\gamma_{\text{м}}$ – моментная зона фазы (диапазон электрических углов, на котором момент однонаправлен при постоянном токе в одной фазе), которая может быть определена на основе анализа семейства зависимостей фазного момента от угловой координаты, полученного при различных значениях тока, например, так как это показано на рис. 5.14.

5. При высоких скоростях и ограничениях, наложенных на ЭДС источника E , минимизация пульсаций момента возможна при увеличении величины Δ_M и k_H или уменьшении величины заданного момента M_C .

6. Формирование оптимальных и квази-оптимальных зависимостей тока от угловой координаты, используемых в качестве задания для токового контура, может быть выполнено различными способами, однако все эти способы подразумевают решение уравнения (5.10).

7. Для достижения приемлемой мощности во второй зоне механиче-

ской характеристики следует осуществлять сдвиг фазного тока в зависимости от частоты вращения в соответствии с выражением:

$$i_3(\gamma, \Omega) = i_3(\gamma + k_c \Omega),$$

при $0 \leq k_c \Omega \leq 22,5$, где k_c – коэффициент сдвига начального положения тока.

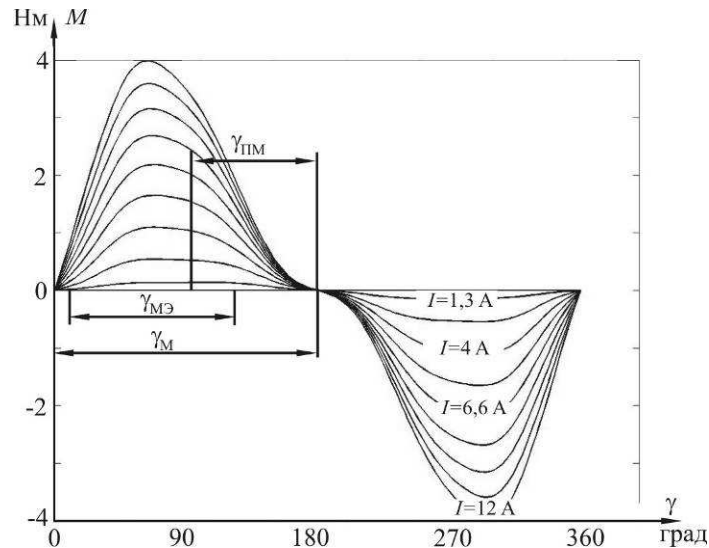


Рис. 5.14. Семейство зависимостей фазного момента от угловой координаты, полученное при различных значениях тока для ВИД 8×10 , $m=4$, $Da1=131$ мм

Для практической реализации мехатронных систем с вентильно-индукторными двигателями, обеспечивающими равномерный выходной момент, следует использовать упрощение. Суть упрощения заключается в распределении момента по фазам так, что суммарный момент остается равномерным, фазные моменты находятся как аппроксимации своих оптимальных зависимостей, а токи вычисляются на основании (5.10). Указанный метод является развитием известного метода дистрибуции момента вентильно-индукторного двигателя, разработанного группой под руководством Р. Кришнана.

5.4 Исследование и минимизация энергопотребления асинхронного электродвигателя в переходных режимах

Энергетические характеристики динамических режимов работы электроприводов подробно изучены для различных случаев пуска и торможения

двигателей без влияния регулирующих устройств [24, 96, 228]. Однако при проектировании мехатронных систем особый интерес представляет исследование зависимости электроэнергетических процессов от структуры и параметров регулирующих устройств [137, 151].

В результате протекания технологических процессов на технологическом оборудовании в электроприводах, которые входят в состав этого оборудования, происходят разгон, торможение, реверсирование, нагружение двигателей. При этом имеет место выполнение механической работы; изменение кинетической энергии вращающихся масс; преобразование электрической энергии в тепловую; рекуперация энергии в сеть. Разнообразие режимов работы мехатронных систем и разное содержание полезной работы в каждом случае не позволяет сформулировать для них единый универсальный критерий энергетической эффективности и провести его оптимизацию.

В связи с этим исследование зависимости потерь в переходных режимах частотно-регулируемых асинхронных двигателей от типа и параметров регуляторов частоты вращения актуально и должно учитываться при разработке мехатронных систем.

Так как такую задачу затруднительно решить в общем виде, так же как сложно подобрать обобщенную машину, то в качестве объекта исследования выберем три электродвигателя, характерных для линейки мощностей низковольтных машин переменного тока: 5A80MA4 (1,1кВт); 5A225M4 (55кВт); 5AM315MB2 (250кВт). Эти три машины фактически покрывают весь диапазон низковольтных машин средней мощности.

Для решения поставленной задачи будем использовать компьютерное моделирование на основе модели асинхронной машины, представленной в параграфе 3.2. При этом нагрузка представлена одномассовой моделью, в системе управления предусмотрено моделирование скалярного вольт-частотного и векторного способов управления частотой вращения.

Энергетические процессы исследуем при пуске асинхронного двигателя в режиме холостого хода и при вентиляторной нагрузке. Зададим значение

приведенного момента инерции нагрузки, равное $J_n = 4J_d$, где J_d – момент инерции двигателя. Приведенный выбор параметров динамической нагрузки основан на обобщении опытных данных, полученных при работе над проектами, проводимыми ПАО «НИПТИЭМ» и ООО «ВЭМЗ-Спектр». Анализ диаграмм разгона на холостом ходу имеет принципиальное значение, так как содержит два характерных участка: разгон, движение без нагрузки. Рассмотрение работы под вентиляторной нагрузкой введено для понимания влияния нелинейной нагрузки на электромеханические процессы.

Для выполнения сравнительного анализа процессов при различных способах управления будем рассматривать процессы одинаковой длительности, равной времени переходного процесса при прямом пуске электродвигателя. Переходные процессы в асинхронном двигателе при прямом пуске, при частотном пуске со скалярным и векторным управлениях показаны соответственно на рис. 5.15, рис. 5.16 и рис. 5.17.

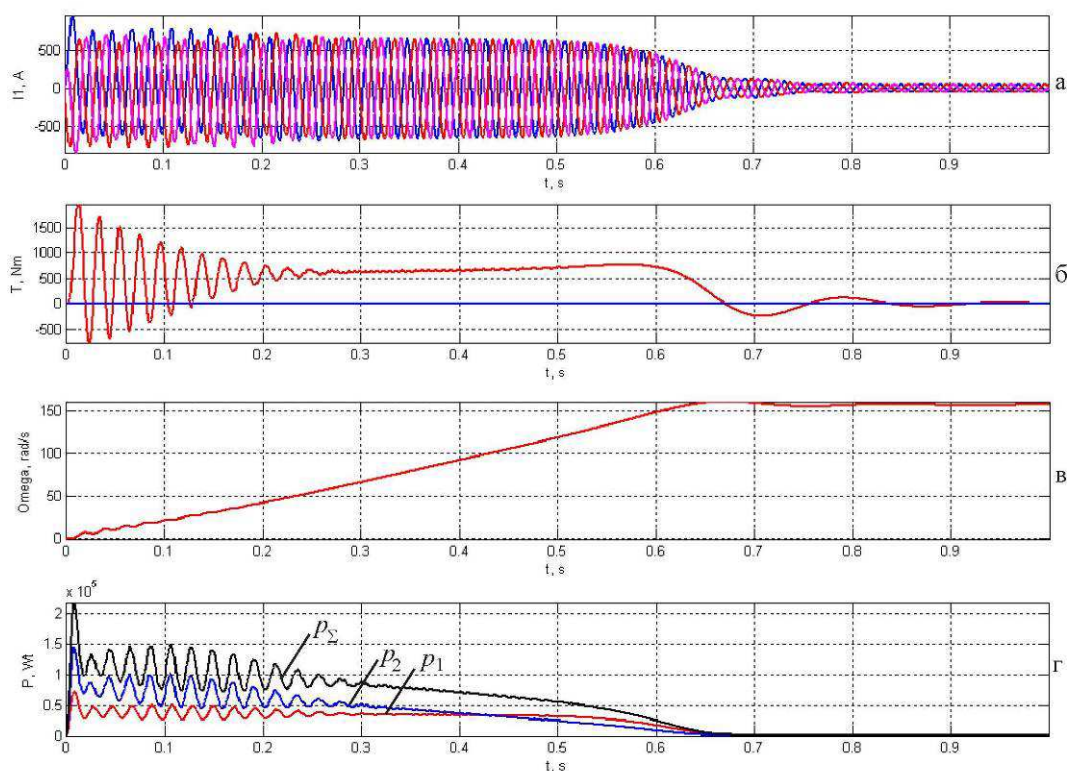


Рис. 5.15. Временные диаграммы прямого пуска асинхронного двигателя 5A225M4:

а – токи статора; б – электромагнитный момент; в – частота вращения ротора;
г – электрические потери в элементах машины

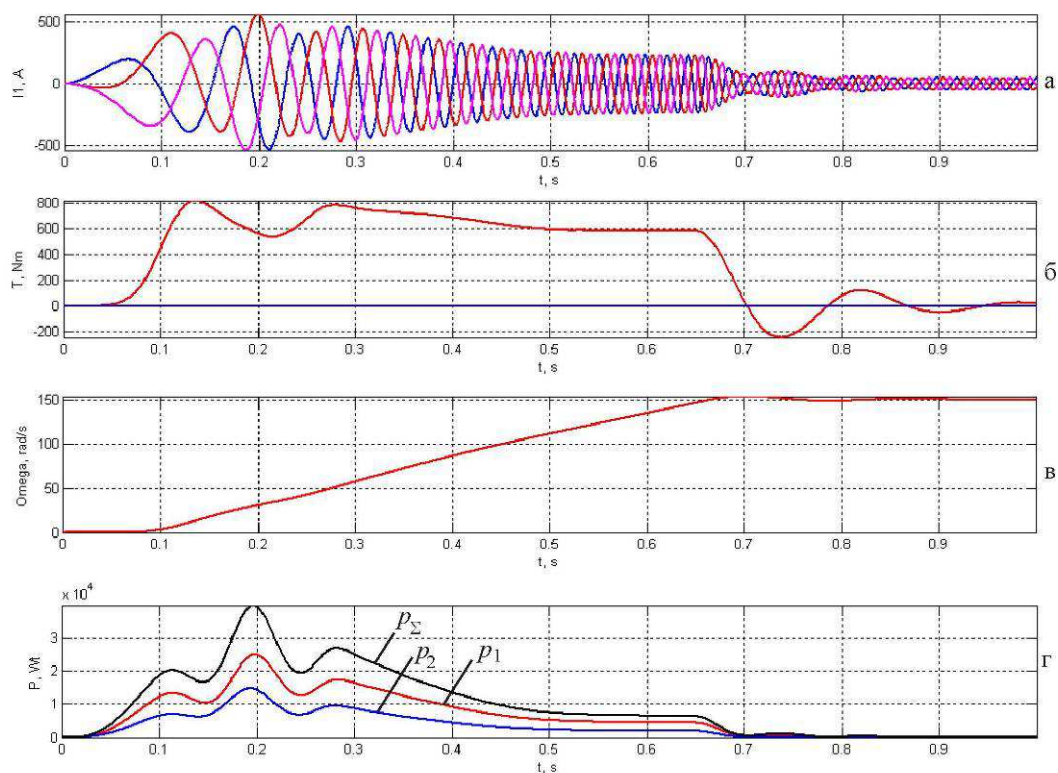


Рис. 5.16. Временные диаграммы пуска двигателя 5A225M4 при скалярном управлении:

а – токи статора; б – электромагнитный момент; в – частота вращения ротора; г – электрические потери в элементах машины

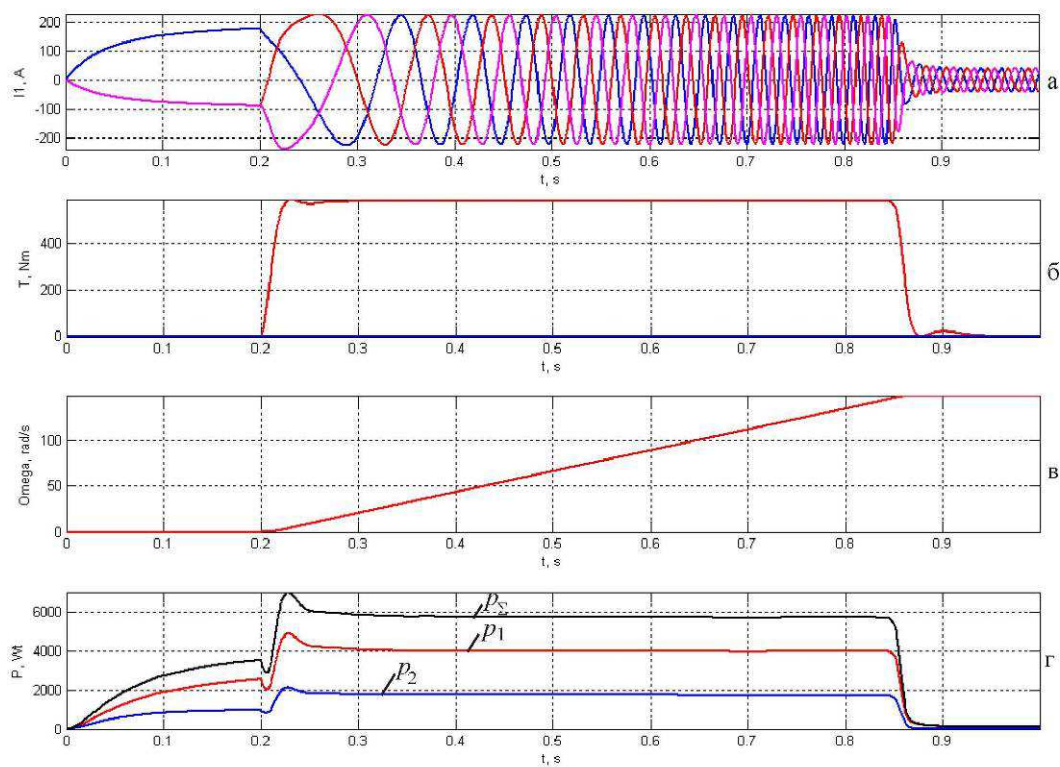


Рис. 5.17. Временные диаграммы пуска двигателя 5A225M4 при векторном управлении:

а – токи статора; б – электромагнитный момент; в – частота вращения ротора; г – электрические потери в элементах машины

На основе результатов моделирования были получены интегральные оценки потерь в переходных процессах при различных способах управления для трех электродвигателей. В табл. 5.2 приведены значения энергии потерь W_{Π} в обмотках электродвигателя за время пуска t_{Π} :

$$W_{\Pi} = \int_0^{t_{\Pi}} p_{\text{эл}} dt = \int_0^{t_{\Pi}} (p_{\text{CU1}} + p_{\text{CU2}}) dt,$$

где $p_{\text{эл}}$ – мощность электрических потерь. КПД пуска определяется по формуле:

$$\eta_{\Pi} = \frac{W_{\text{к}}}{W_{\text{к}} + W_{\Pi}},$$

где $W_{\text{к}}$ – кинетическая энергия вращающегося ротора с моментом инерции $J_{\text{н}}$ при установившейся скорости Ω :

$$W_{\text{к}} = \frac{(J + J_{\text{н}})\Omega^2}{2}.$$

На рис. 5.18 приведены временные диаграммы процессов пуска асинхронного двигателя 5A225M4 при скалярном и векторном управлении при вентиляторной нагрузке.

Таблица 5.2. Потери и КПД за время пуска в асинхронных двигателях при различных способах управления

Способ управления	Двигатель 5A80MA4		Двигатель 5A225M4		Двигатель 5AM315MB2	
	Оценка электрических потерь, кДж	КПД пуска, при $W_{\text{к}}=0,246$ кДж	Оценка электрических потерь, кДж	КПД пуска, при $W_{\text{к}}=31$ кДж	Оценка электрических потерь, кДж	КПД пуска, при $W_{\text{к}}=505$ кДж
Прямой пуск	0,65	0,27	50,27	0,38	737,56	0,41
Скалярное управление	0,50	0,32	9,35	0,77	79,85	0,86
Векторное управление	0,35	0,41	3,60	0,89	33,20	0,94

Оказалось, что тип нагрузки, например, наличие вентиляторной нагрузки, не оказывает существенного влияния на энергетические характеристики пуска. В тоже время, тип управления частотой вращения значительно влияет на потери энергии и КПД пуска. Например, для двигателя 5A225M4

электрические потери при прямом пуске составляют 57,8 кДж, при пуске с вольт-частотным регулятором – 11,8 кДж, при пуске на основе векторного управления частотой вращения – 3,9 кДж.

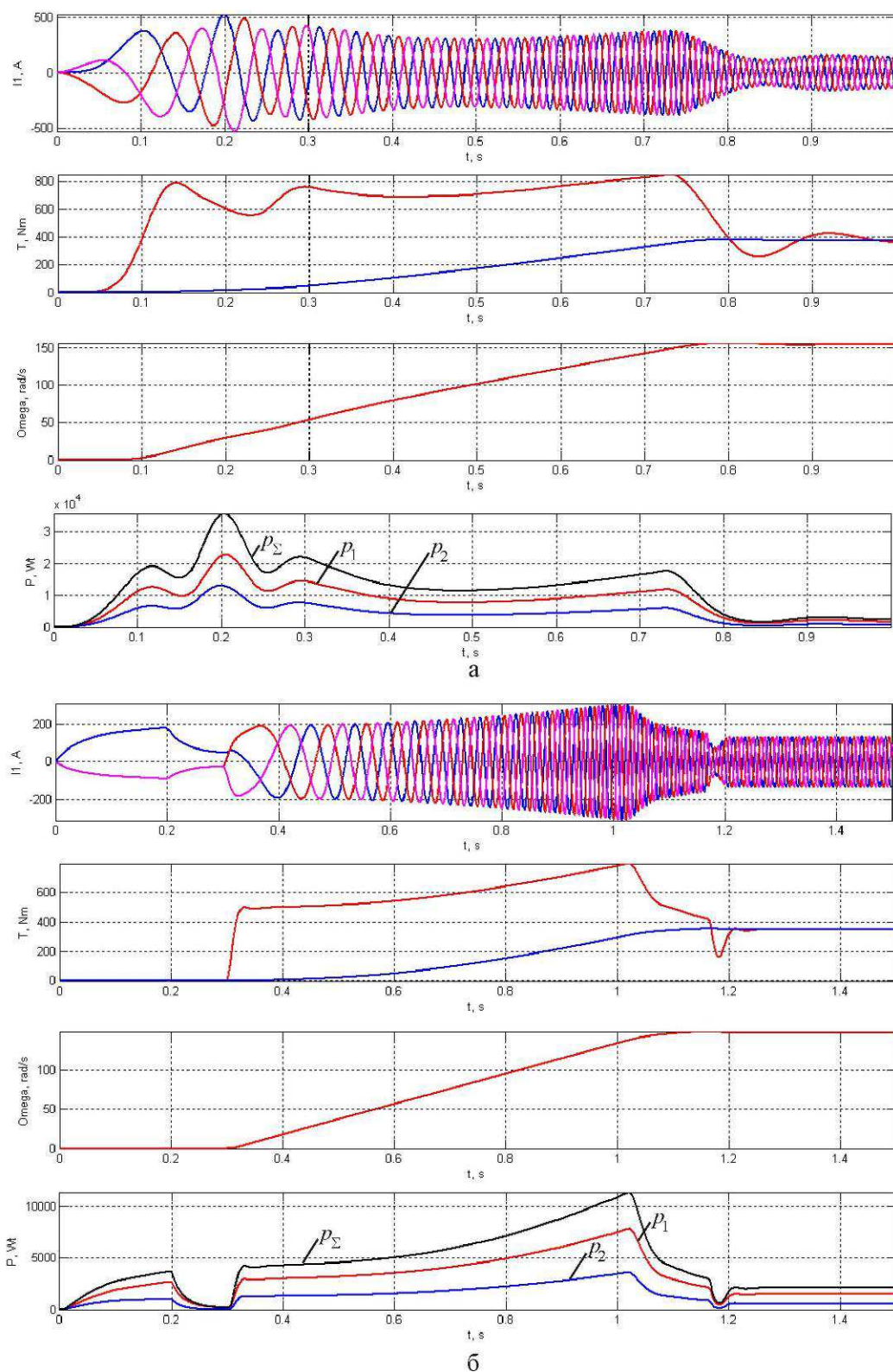


Рис. 5.18. Временные диаграммы пуска асинхронного двигателя 5A225M4 с вентиляторной нагрузкой при скалярном (а) и векторном (б) способах управления

Анализ результатов позволил сделать следующие выводы:

1. Наиболее эффективным по энергетическому критерию в переходных режимах является векторное управление частотой вращения.

2. Энергетическая эффективность в переходных режимах при векторном управлении повышается с увеличением мощности двигателя.

Высокие энергетические показатели векторного управления асинхронным двигателем объясняются следующим образом. Электромагнитный момент асинхронной машины во вращающейся системе координат, ориентированной по потоку ротора, определяется выражением:

$$M = \frac{3}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d), \quad (5.15)$$

где ψ_d , ψ_q , i_d , i_q – компоненты потокосцепления и тока статора. Векторное управление обеспечивает ориентацию системы координат таким образом, что продольная составляющая потокосцепления равна заданному значению потока $\psi_d = \Psi^*$, а поперечная отсутствует $\psi_q = 0$. В этом случае выражение (5.15) принимает вид:

$M = \frac{3}{2} \Psi^* i_q$, что соответствует максимальному значению момента при минимальном значении тока, в сравнении с двумя другими типам управления.

Особый практический интерес представляет вопрос о зависимости пусковых потерь от параметров регулятора частоты вращения, в качестве которого обычно используются пропорционально-интегральные устройства. Очевидно, что наибольшее влияние на пусковые потери оказывает время разгона, которое в основном определяется пропорциональной составляющей регулятора частоты вращения. Исследования влияния пропорциональной составляющей регулятора частоты вращения на энергетические характеристики при переходных процессах проводились для электропривода с векторным управлением. В качестве базовых параметров пропорционально-интегрального регулятора с передаточной функцией, представленной в виде [154, 199, 258]:

$$H_p(s) = k_p + \frac{1}{T_p s},$$

были приняты настройки k_{p0} и T_{p0} на технический оптимум [119, 199].

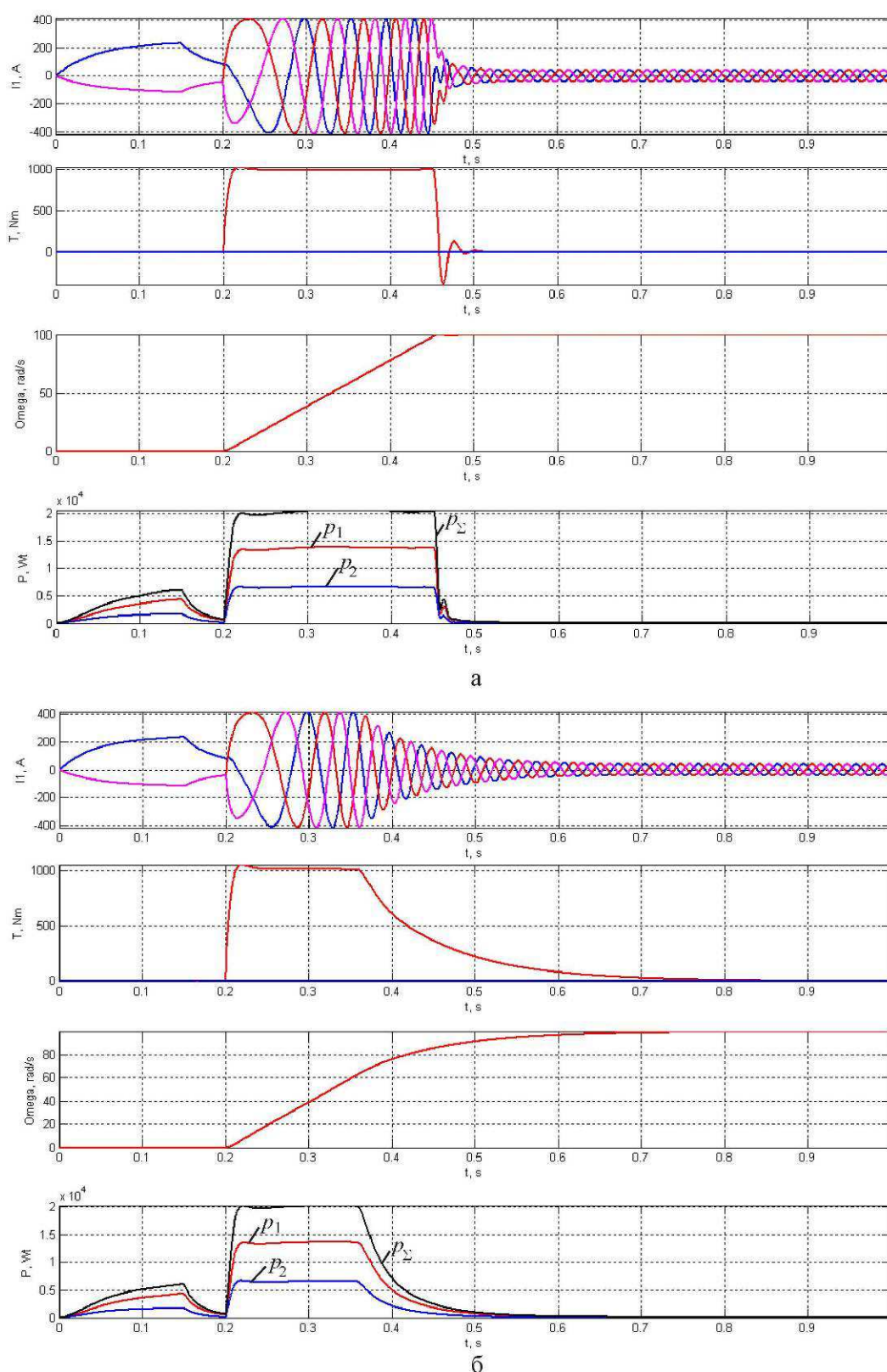


Рис. 5.19. Временные диаграммы частотного пуска асинхронного двигателя при настройке контура частоты вращения:
а) на технический оптимум k_{p0} ; б) на коэффициент передачи $k_p = k_{p0}/12$

На рис. 5.19 показаны временные диаграммы пуска электропривода с электродвигателем 5A225M4 при двух значениях пропорциональной составляющей регулятора частоты вращения. На рис. 5.20 приведены графики зависимостей потерь и времени пуска от коэффициента передачи пропорциональной составляющей регулятора, полученные для двигателя 5A225M4. Аналогичные результаты получены при моделировании других машин, а именно 5A80MA4 и 5AM315MB2. Снижение потерь при уменьшении коэффициента передачи регулятора частоты вращения объясняется двумя факторами: затягиванием разгона во времени – снижением быстродействия; отсутствием участка торможения, направленного на уменьшение перерегулирования. При этом снижения точности системы не происходит, так как интегральная составляющая регулятора частоты вращения сохраняется. Аналогичные результаты могут быть достигнуты с помощью введения в систему управления дополнительного элемента – «задатчика интенсивности», при таком подходе произойдет снижение быстродействия только по заданию частоты вращения, быстродействие по возмущающему воздействию сохранится.

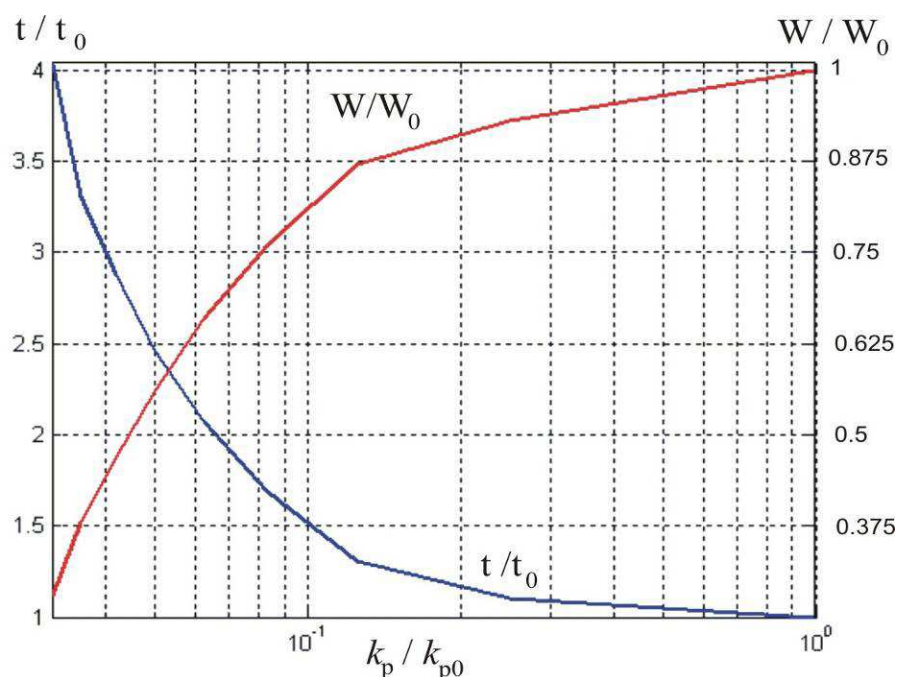


Рис. 5.20. Зависимость потерь и времени пуска от коэффициента передачи регулятора частоты вращения:

W_0, t_0 – потери и время пуска при настройке регулятора частоты вращения на технический оптимум с коэффициентом передачи k_{p0} ; W, t – фактические значения рассеиваемой энергии и времени пуска при коэффициенте передачи k_p

Потери в динамических режимах работы могут оказывать существенное влияние на надежность машины. Это объясняется резким набором температуры обмотки статора – «термоударом» в таких режимах, что особенно характерно для разгона на холодную, когда скорость нарастания температуры обмотки статора для серийных машин составляет $0,2...0,5$ °C/с и $0,4...0,9$ °C/с, при соответствующих кратностях тока 150% и 200%.

Оценка ресурса электрической машины может производиться на основе стандарта по расчету на надежность [159], который учитывает увеличение скорости дефектности изоляции провода от его средней температуры, среднеквадратического отклонения температуры обмотки статора, интенсивности резких нагревов (величины пусков двигателя в час). Значение температуры обмотки статора и ее среднеквадратическое отклонение следует оценивать по модели тепловых процессов, представленной в параграфе 3.4.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. В электроприводах и мехатронных системах, с частотно-регулируемыми электродвигателями, имеющими пропорционально-интегральный регулятор частоты вращения ротора, энергетические характеристики имеют высокую чувствительность к вариациям коэффициента передачи данного регулятора. При этом энергия, потребляемая из сети за время переходного процесса, практически прямо пропорциональна коэффициенту передачи регулятора.

2. Зависимости потребляемой энергии и КПД от параметров настройки регуляторов имеют монотонный характер. Существенное уменьшение потерь при пуске может быть достигнуто уменьшением коэффициента передачи регулятора частоты вращения ротора, за счет снижения быстродействия.

3. Следует искать такие параметры управления частотой вращения двигателя, которые обеспечивают выполнение технологической задачи при минимальном быстродействии, что снижает количество и величину «термоударов» обмотки статора.

5.5 Исследование и минимизация энергопотребления при циклических режимах работы

Как было отмечено в первой главе работы, внедрение энергосберегающих технологий в электромеханические системы – актуальная задача. Интересным является вопрос, посвященный пределам энергосбережения, которые могут быть получены от использования энергоэффективных электродвигателей, применения регулируемого электропривода, освоения мехатронных технологий, а также вопрос, раскрывающий то, за счет каких факторов эта экономия происходит.

Рассмотрим указанный вопрос на примере центробежных насосов [72]. Величина экономии энергии, полученная от внедрения регулируемого электропривода, может изменяться в широких пределах (от 5 до 30%). Это зависит от типа перекачиваемой жидкости, суточной диаграммы работы, а также некоторых других инженерных решений, примененных в разработке. Цель данного параграфа работы заключается в исследовании целесообразности внедрения энергоэффективных и частотно-регулируемых электродвигателей и мехатронных систем с точки зрения энергосбережения.

В ходе проведения работы были получены результаты для оценки энергоэффективности трех технологий:

- применение нерегулируемого электропривода с электродвигателями общепромышленной серии 5А и энергоэффективной серии 7AVE (7А) при регулировании расхода жидкости с помощью дросселя;
- применение регулируемого электропривода с электродвигателями серий 5А, 7А;
- применение мехатронной системы на основе специального частотно-регулируемого электродвигателя серии 7AF [191].

Характеристики исследуемых двигателей в номинальном режиме приведены в таблице 5.3. Исследование проводилось для насосной станции подачи чистой воды на высоту $H_C=30$ м, насосом типа АЦГС80.3/2-18.5/4 производства ООО «ЛИНАС». Насосный агрегат имеет следующие параметры:

номинальная подача $Q_H=56,7 \text{ м}^3/\text{ч} = 0,01575 \text{ м}^3/\text{с}$; номинальный напор 54,5 м; номинальный КПД 69,8%. Суточный график подачи воды имеет обобщенный характер [128, 129], приведенный на рис. 5.21.



Рис. 5.21. Суточный график подачи воды

Таблица 5.3. Зависимость КПД от нагрузки

Тип	P_2 , кВт	КПД, %, при нагрузке, %			$\cos \varphi$
		100	75	50	
5A160M4	18,5	90,1	90,6	88,9	0,86
7AR160M4	18,5	92,2	92,5	90,7	0,83
7AF160M4	18,5	92,1	92,6	91,1	0,86

Мощность, потребляемая насосом в номинальном режиме, определялась по формуле:

$$N_H = \frac{\rho g Q_H H_H}{\eta_{\text{НАС}}}, \quad (5.16)$$

где ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; Q_H – номинальная подача насоса $\text{м}^3/\text{с}$; $g=9,81 \text{ м}/\text{с}^2$; H_H – номинальный напор насоса, м; $\eta_{\text{НАС}}$ – номинальный КПД насоса.

Энергия, потребляемая насосом при регулировании с помощью задвижки (дресселированием), определялась в соответствии с выражением:

$$W_{\text{НЕРЕГ}} = \frac{N_H (1 + \lambda)}{4\eta_{\text{ЭД}}} \left[(1 + H^*) + \lambda^2 (1 - H^*) \right], \quad (5.17)$$

где $\lambda = Q/Q_H$ – относительная подача; $H^* = H_C/H_H$ – относительный статический напор; $\eta_{\text{эд}}$ – КПД электродвигателя; H_C – статический напор.

Энергия, потребляемая насосом при частотном регулировании, определялась в соответствии с выражением:

$$W_{\text{рег}} = \frac{\rho g \lambda Q_H H^* H_H k_3}{\eta_{\text{эд}} \eta_{\text{нас}}}, \quad (5.18)$$

где $\eta_{\text{нас}} = 1 - \frac{1 - \eta_{\text{HHAC}}}{n^*}$ – КПД насоса при частоте вращения n ; $n^* = n/n_{\text{ном}}$ – относительная частота вращения; $n = n_{\text{ном}} \sqrt{H^* + \lambda^2 (1 - H^*)}$ – частота вращения, обеспечивающая необходимую подачу на рабочей характеристике трубопровода; k_3 – коэффициент запаса по напору. Выражения (5.16), (5.17), (5.18) рекомендованы для расчета потребляемой энергии в специальной литературе [128, 129], посвященной использованию электропривода в насосных приложениях.

Для каждой точки суточного графика определялись необходимая нагрузка электродвигателя, частота вращения, КПД насосного агрегата. Далее на основе методики, приведенной в параграфе 4.1, вычислялся КПД двигателя при расчетной нагрузке и частоте вращения, полученной при условии минимизации мощности потерь в машине. В результате были получены данные, характеризующие суточное потребление электроэнергии, приведенные в таблице 5.4. Для наглядности результатов данные суточного энергопотребления приведены на диаграмме, показанной на рис. 5.22.

Анализ результатов расчета суточного потребления электроэнергии, приведенных в таблице 5.4, показал:

1. Экономия энергии за счет замены общепромышленного электродвигателя серии 5А на энергоэффективный двигатель серии 7А в нерегулируемом электроприводе практически отсутствует.

2. Экономия энергии за счет замены регулирования дросселированием на частотное регулирование составляет 9,92%.

3. Экономия энергии, возникающая при переходе от регулирования дросселированием на частотное регулирование и замене общепромышленного электродвигателя серии 5А на энергоэффективный двигатель серии 7А, составляет 10,52%.

4. Экономия энергии, возникающая при переходе от регулирования дросселированием на применение мехатронных систем со специальным электродвигателем серии 7АF, составляет 10,63%.

Таблица 5.4. Электропотребление по часам в различных вариантах

Время суток, ч	Относительная подача воды	n, об/мин	Потребляемая электроэнергия кВт·ч						
			с регулируемым электроприводом				без регулируемого электропривода		
			*	5А	7А	7АF	*	5А	7А
0-1	0,45	1161	5,43	6,00	6,01	6,00	7,17	7,97	8,03
1-2	0,41	1147	4,94	5,46	5,49	5,48	6,91	7,69	7,76
2-3	0,39	1140	4,70	5,20	5,23	5,23	6,78	7,56	7,62
3-4	0,37	1134	4,46	4,94	4,98	4,98	6,66	7,43	7,50
4-5	0,37	1134	4,46	4,94	4,98	4,98	6,66	7,43	7,50
5-6	0,44	1157	5,30	5,85	5,87	5,86	7,11	7,91	7,97
6-7	0,47	1169	5,67	6,22	6,27	6,25	7,31	8,11	8,17
7-8	0,47	1169	5,67	6,22	6,27	6,25	7,31	8,11	8,17
8-9	0,56	1206	6,75	7,43	7,42	7,41	7,96	8,81	8,85
9-10	0,85	1356	10,24	11,24	11,09	11,07	10,46	11,48	11,36
10-11	0,88	1374	10,61	11,65	11,49	11,48	10,76	11,81	11,67
11-12	0,86	1362	10,38	11,40	11,24	11,23	10,56	11,59	11,46
12-13	0,8	1327	9,65	10,60	10,54	10,53	9,98	10,97	10,97
13-14	0,8	1327	9,65	10,60	10,54	10,53	9,98	10,97	10,97
14-15	0,79	1327	9,65	10,60	10,54	10,53	9,98	10,97	10,97
15-16	0,78	1316	9,41	10,34	10,28	10,27	9,79	10,76	10,77
17-18	0,82	1339	9,89	10,86	10,80	10,79	10,17	11,17	11,05
18-19	0,88	1374	10,61	11,65	11,49	11,48	10,76	11,81	11,67
19-20	0,94	1411	11,34	12,45	12,27	12,25	11,39	12,49	12,34
20-21	0,96	1424	11,58	12,71	12,53	12,51	11,61	12,73	12,58
21-22	1	1450	12,06	13,23	13,05	13,03	12,06	13,22	13,06
22-23	0,85	1356	10,24	11,24	11,09	11,07	10,46	11,48	11,36
23-24	0,57	1210	6,87	7,56	7,55	7,54	8,03	8,88	8,92
0-24	15,71		189,56	208,38	207,02	206,75	209,86	231,35	230,86
Э, %				9,92	10,52	10,63		0	0,21

Примечание: n – частота вращения, обеспечивающая необходимую подачу (для насоса с регулируемым электроприводом); * – потребляемая энергия без учета КПД электродвигателя.

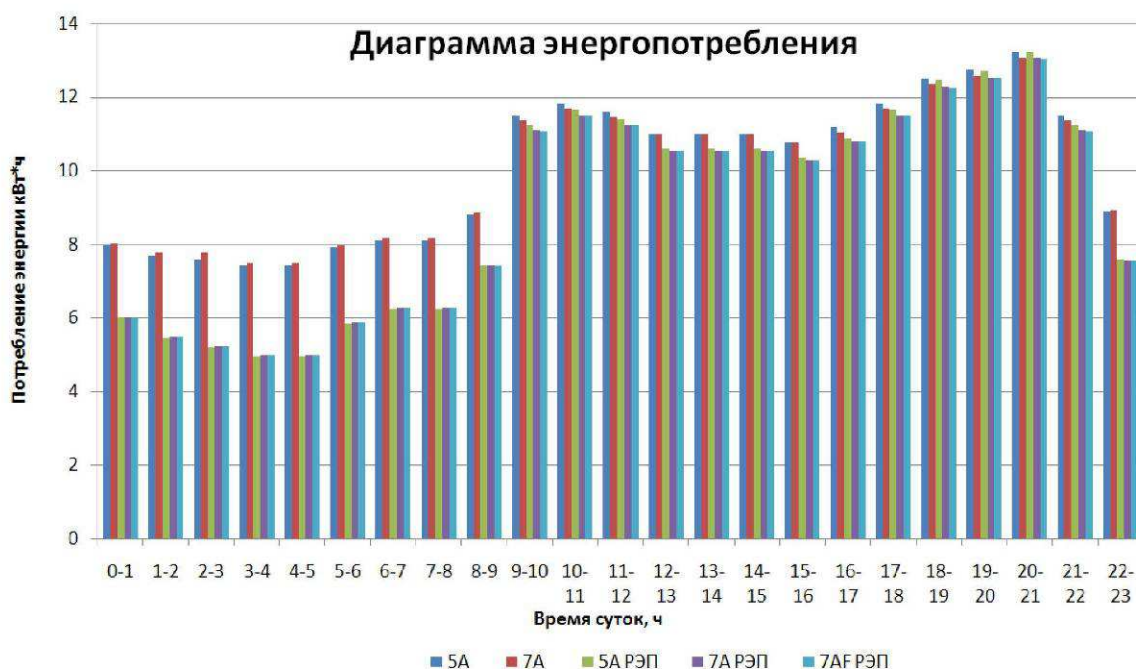


Рис. 5.22. Диаграмма суточного потребления электроэнергии

Анализ суточного распределения потребления электроэнергии, приведенный на рис. 5.22, показал:

1. Регулируемый электропривод с электродвигателями серии 5А имеет лучшее энергосбережение при меньших значениях подачи.
2. Регулируемый электропривод с электродвигателями серии 7А имеет лучшее энергосбережение при максимальных подачах.
3. Мехатронная система с электродвигателями серии 7AF обеспечивает высокую энергетическую эффективность в широком диапазоне подач воды.
4. Энергосбережение, за счет регулирования частоты вращения, в системе с заданной суточной подачей воды возможно только в режимах частичной нагрузки. Таким образом, при замене отработавших электродвигателей насосных установок на новые целесообразно выбирать тип двигателя на основе диаграммы суточного энергопотребления. При этом выбор возможно осуществлять с использованием методик [128, 129], упрощенно учитывающих энергетику электродвигателя. Предложенная в настоящем параграфе методика основана на применении энергетического расчета статического режима (см. параграф 4.1, 5.1). Ее использование позволяет точнее вычислять энергетические

показатели частотно-регулируемого электродвигателя в мехатронной системе. Для сравнительной оценки себестоимости электродвигателей, на которых проводилось исследование, приведена таблица 5.5.

Таблица 5.5. Массогабаритные показатели и оценка себестоимости АЭД

Тип / серия	Мощность, кВт	L_1 , мм	Себестоимость, у.е.	Масса активной части, кг		
				стали	меди	алюминия
5A160M4 / 5A	18,5	180	26,87	47,75	10,82	3,36
7AR160M4 / 7A	18,5	210	28,81	61,47	10,90	3,22
5AF160M4 / 7AF	18,5	180	26,34	52,48	10,04	3,42

Примечание: Условная единица себестоимости (у.е.) равна цене одного килограмма меди, m_{FE} – масса сердечников ротора и статора, m_{CU} – масса обмотки статора, m_{AL} – масса обмотки ротора.

Данные, приведенные в таблице 5.5, показывают, что специальные частотно-регулируемые электродвигатели серии 7AF обеспечивают высокие показатели энергосбережения при эксплуатации в составе мехатронных систем насосов, что иллюстрирует перспективы применения мехатронных технологий. Кроме того, характеризуются высокими показателями экономии материалов, необходимых для их серийного производства.

Таким образом:

1. Экономия энергии в системах с регулированием частоты вращения возможна только при сложном неравномерном графике подачи воды, а значит, при неравномерной нагрузке электродвигателя.

2. Наиболее целесообразно отработавшие двигатели частотно-регулируемых центробежных насосов заменять мехатронными системами, построенными на основе специальных частотно-регулируемых электродвигателей, так как только при их использовании могут быть получены высокие показатели энергосбережения как в режимах частичной нагрузки, так и на номинальной мощности.

3. Применение общепромышленных энергоэффективных электродвигателей в нерегулируемом электроприводе насосов не оправдано.

5.6 Комплексная процедура оптимизации системы на примере двигателей лифтовой лебедки

В качестве примера применения комплекса методик оптимизации, приведенных в предыдущих параграфах, рассмотрим задачу проектирования активных частей серии двигателей безредукторной лифтовой лебедки. Данная разработка была проведена на основе предложенной концепции оптимизации статических и динамических характеристик электрических машин. Концепция была проверена, освоена и применена группой авторов [74, 81, 294] при разработке серии безредукторных лифтовых лебедок и вошла в третий раздел диссертации Кругликова О.В. [125].

В работе для повышения технического уровня лифтовых электродвигателей сформулированы и решены задачи:

- 1) обеспечения необходимых пусковых и перегрузочных характеристик двигателей;
- 2) обеспечения низкого уровня акустического шума;
- 3) обеспечения допустимых тепловых режимов электрической машины;
- 4) уменьшения потребляемой энергии в течение жизненного цикла лифтовой лебедки.

Для чего предлагается применить в лифтовых частотно-регулируемых лебедках специальные тихоходные электродвигатели при исключении редуктора из системы лебедки. Это позволит решить задачу обеспечения низкого уровня акустического шума за счет питания двигателя напряжением с низкой частотой, а также максимально использовать активные материалы электрической машины. Но вызовет необходимость обеспечить допустимые тепловые режимы и перегрузочные характеристики машины.

Для этого были разработаны специальные высокомоментные электродвигатели [162]. При их разработке использовались проектные и поверочные расчеты, в том числе с использованием специальных моделей оптимизации [108], в результате стало необходимо проанализировать три варианта пазово-зубцовой геометрии активных частей электродвигателей. Частотно-

регулируемых двигателей с конструкцией активной части, обеспечивающей повышенное использование «меди» в пазу – 5AF200..8. Специальных частотно-регулируемых электродвигателей с конструкцией активной части, обеспечивающей повышенное использование «стали» магнитопровода – 7A200..8К. Специальные частотно-регулируемые электродвигатели с конструкцией активной части, обеспечивающей максимальное использование «меди» в пазу – 7A200..8М. Основные отличия пазовой геометрии указанных двигателей проявляются в соотношении ширины зубца к полюсному делению, что выражается в разнице отношений индукции в воздушном зазоре к индукции в зубце статора и ротора. Эти соотношения приведены в таблице 5.6.

Предпосылками для анализа пазово-зубцовой геометрии в данном контексте послужило исследование влияния на механические характеристики величины отношения ширины зубца к ширине зубцовой зоны. Его причиной, в свою очередь, стало сомнение относительно утверждения ряда авторов [133, 180] о целесообразности применения в частотном приводе машин с увеличенным использованием «меди» в пазу.

Таблица 5.6. Соотношения параметров, характеризующих радиальную геометрию электродвигателя

Тип двигателя	Вариант магнитопровода	D_{a1} , мм	z_1/z_2	B_D/B_{Z1}	Q_1'/Q_2
5AF200..8	«медно–стальной»	327	72/68	0,41	136/152
7A200..8М	«медный»	327	72/86	0,40	167/121
7A200..8К	«стальной»	327	72/86	0,47	124/102

Примечание: B_D/B_{Z1} – отношение величины индукции в воздушном зазоре к индукции в зубце статора; Q_1'/Q_2 – отношение эффективной площади паза статора к площади паза ротора

Для этого были проведены исследования, в ходе которых разрабатывались активные части электродвигателей, имеющих одинаковые главные размеры, но разное отношение ширины зубца к зубцовому делению статора. Индукция в зубце статора выбиралась одинаковой, что характерно для машин, имеющих идентичные возможности повышения магнитного потока для компенсации снижения максимального момента за счет увеличения амплиту-

ды напряжения. При этом двигатели с низким значением отношения величины зубца статора к зубцовому делению характеризуют машины с увеличенной площадью паза статора. В таблице 5.7 и на рис. 5.23 приведены основные результаты этого исследования.

Таблица 5.7. Сравнительные значения параметров схемы замещения и энергетических характеристик

	b_{z1}/t_{z1}	КПД, %	I_1 , А	I_m , А	E_0 , В	R_1 , Ом	R_2 , Ом	X_1 , Ом	X_2 , Ом	X_m , Ом	B_D , Тл	B_{z1} , Тл
1	0,445	90,8	36,6	13,5	212	0,214	0,114	0,522	0,544	15,7	0,71	1,77
2	0,425	90,8	34,9	11,7	213	0,225	0,117	0,558	0,595	18,1	0,70	1,77
3	0,405	90,8	34,6	10,3	213	0,241	0,122	0,608	0,656	20,7	0,66	1,77
4	0,465	90,8	36,5	15,8	212	0,201	0,108	0,477	0,492	13,4	0,77	1,77
5	0,485	90,5	37,9	18,4	211	0,193	0,108	0,454	0,461	11,46	0,81	1,77
6	0,505	90,3	39,7	21,7	210	0,183	0,105	0,421	0,420	9,70	0,84	1,77

Примечание: b_{z1} – средняя ширина зубца статора; t_{z1} – зубцовое делений статора; E_0 – ЭДС холостого хода; X_1 , X_2 , X_m – индуктивное сопротивление статора, ротора, главного поля.

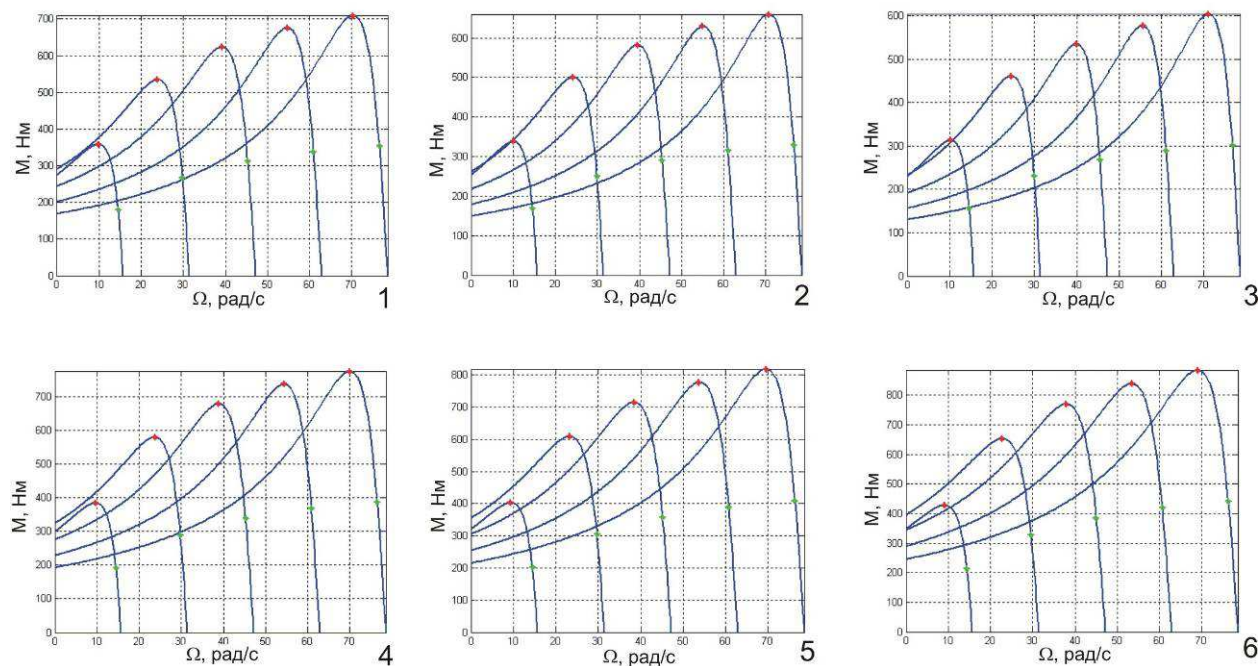


Рис. 5.23. Вид семейства механических характеристик, полученных при различных соотношениях пазовой геометрии

Необходимо отметить, что каждая строка – это оптимизированный вариант пазово-зубцовой геометрии, а семейство механических характеристик

соответствует пропорциональному изменению амплитуды и частоты напряжения. То есть, какие-либо действия для компенсации снижения магнитного потока возникающего из-за влияния падения напряжения на активном сопротивлении не проводятся. Если считать вариант, соответствующий строке и рисунку 1, базовым, то варианты, соответствующие строкам и рисункам 2 и 3, соответствуют машинам с увеличенным использованием «меди», варианты 4, 5, 6 соответствуют машинам с увеличенным использованием «стали». Из рисунка видно, что увеличение площади паза и, следовательно, меди не повышает критический момент, в сравнении с базовым вариантом, при снижении частоты. Однако уменьшается величина тока холостого хода. В «стальных» вариантах критический момент растет с ростом величины индукции в зазоре как в области низких частот, так и на номинальной частоте. Из этого следует, что утверждение о необходимости максимально вкладывать «медь» в активное железо при использовании машины на низких частотах вращения не соответствует действительности. Дальнейший анализ таблицы 5.7 и рис. 5.23 показывает, что максимальный момент на низких частотах существенно зависит от активного сопротивления статора и индуктивных сопротивлений статора и ротора. Однако эта зависимость требует отдельного исследования, которое будет сделано в главе 7.

В соответствии с установленными фактами было необходимо найти оптимальные решения активной геометрии для всех трех проектных вариантов пазово-зубцовых геометрий, с учетом использования их в лифтовом безредукторном электроприводе. В таблицах 5.8-5.9 приведены основные результаты электромагнитного расчета разработанных лифтовых электродвигателей.

Таким образом, из таблиц 5.8-5.9 видно, что наименьший вес обмоточной меди и длину активной части при нормальных значениях КПД (соответствующим другим вариантам) и высоких значениях кратности максимального момента имеют электродвигатели с конструкцией активной части, обеспечивающей повышенное использование «стали» магнитопровода (выделенные

в таблицах 5.8-5.9. Что подтверждает ранее сделанные выводы. Этот вариант был выбран в качестве перспективного решения.

Таблица 5.8. Расчетные параметры вариантов электродвигателей привода безредукторного лифта грузоподъемностью $G=400, 630, 1000$ кг и кратностью полиспаста 2:1

Тип	G , кг	L , мм	P_2 , кВт	U_1 , В	f_1 , Гц	КПД, %	$\cos\varphi$	I_1 , А	M , Нм	S , %	K_M	m_{CU} , кг
5AF200M8	400	195	2,6	202	8,9	70,3	0,83	7,3	204	8,8	1,81	15,3
7A200M8M	400	195	2,5	205	8,8	73,6	0,79	7,1	202	8,9	2,20	18,7
7A200M8K	400	195	2,5	204	8,8	71,4	0,78	7,5	201	8,1	2,18	13,2
5AF200LB8	630	225	4,1	202	9,0	68,9	0,83	11,9	322	9,9	1,73	17,0
7A200LB8M	630	225	4,1	204	9,0	71,1	0,80	11,8	325	10,9	1,97	21,2
7A200LB8K	630	225	4,1	209	9,0	70,0	0,85	11,1	324	10,6	1,90	15,1
5AF200LD8	1000	260	6,4	202	9,2	65,6	0,81	20,0	505	11,6	1,62	19,3
7A200LD8K	1000	260	6,4	204	9,2	67,9	0,81	19,0	502	11,7	1,84	17,3

Таблица 5.9. Расчетные параметры вариантов электродвигателей привода безредукторного лифта грузоподъемностью $G=400, 630$ кг и кратностью полиспаста 1:1 (прямой подвес)

Тип	G , кг	L , мм	P_2 , кВт	U_1 , В	f_1 , Гц	КПД, %	$\cos\varphi$	I_1 , А	M , Нм	S , %	K_M	m_{CU} , кг
5A200L8	400	225	2,4	194	5,1	47,1	0,87	10,0	383	21,2	1,23	17,0
7A200L8M	400	225	2,4	204	5,0	48,4	0,80	9,6	380	21,5	1,32	22,1
7A200L8K	400	225	2,4	196	5,0	50,21	0,85	9,6	381	20,1	1,38	15,3
5AF200LC8	630	260	3,5	201	5,4	44,0	0,89	14,8	557	25,9	1,16	19,3
7A200LC8M	630	260	3,7	208	5,4	47,2	0,86	14,5	603	27,7	1,28	23,9
7A200LC8K	630	260	3,8	208	5,3	46,7	0,87	14,9	600	24,5	1,29	17,1

Для учета влияния системы управления было проведено имитационное моделирование цикла работы мехатронной системы. Этот цикл состоит из режима намагничивания, при котором электродвигатель не совершает преобразования энергии, но значение магнитного потока соответствует номинальному; режима разгона, режима движения, который соответствует подъему груза; режима торможения; режима удержания, при котором двигатель удерживает статический момент нагрузки, но вал не вращается. Режим намагничивания аналогичен режиму активного поля, при котором магнитное поле с машины не снимается. На рис. 5.24. приведены временные диаграммы, отражающие основные режимы работы тихоходного электродвигателя 5AF200L8

мехатронной системы безредукторного привода лифтовой лебедки. В целях экономии времени моделирования типовой цикл изменен путем сокращения времени работы в номинале с девяти до двух секунд.

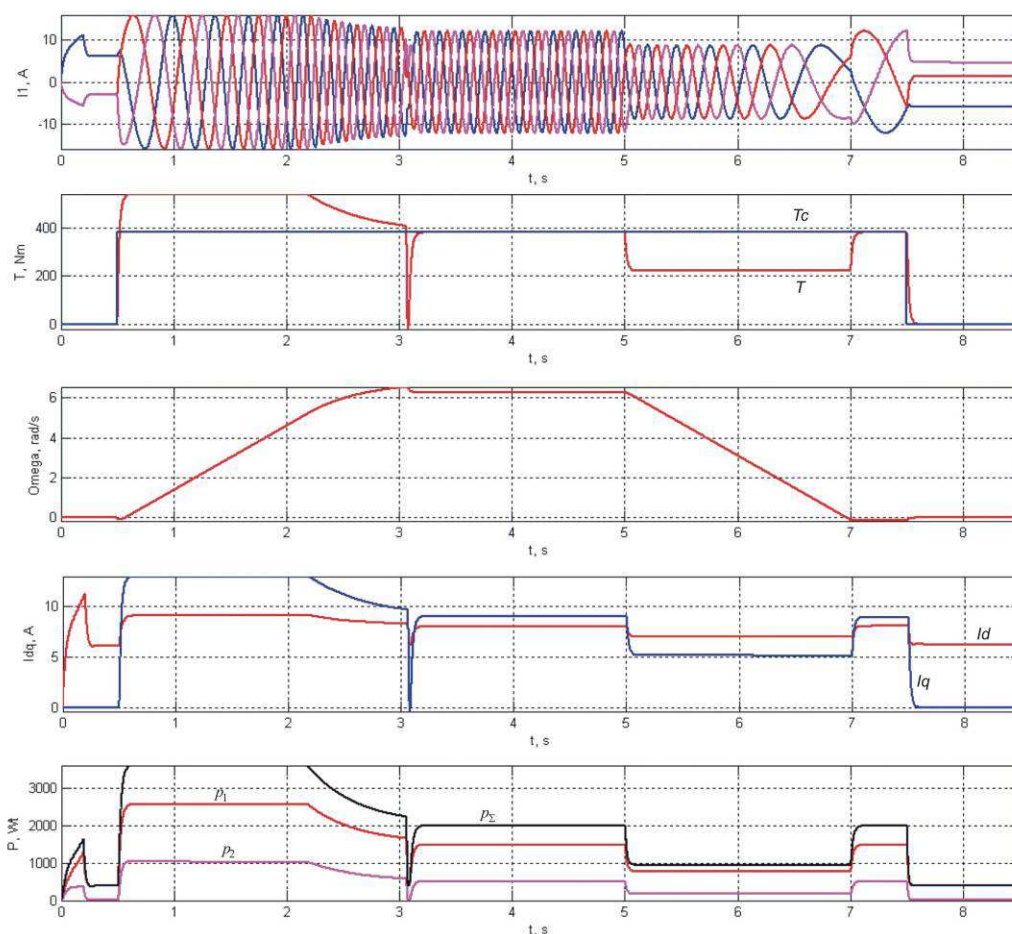


Рис. 5.24. Временные диаграммы основных режимов электродвигателя 5AF200L8:

$I1$ – фазные токи обмотки статора (А); T , T_c – момент электродвигателя и момент нагрузки соответственно (Нм); Ω – угловая частота вращения (рад/с); I_d , I_q – намагничивающая и активная составляющие тока статора, соответственно

В таблице 5.10 приведены усредненные значения электромеханических характеристик и мощности потерь в основных режимах работы мехатронной системы лифтовой лебедки, рассчитанные для электродвигателей 5AF200L8 и 7A200L8. При работе на частоте 5,2 Гц вклад магнитных потерь минимален (составляет 30Вт), поэтому они исключены из анализа, а в таблице приведены только электрические потери статора и ротора.

Результаты исследования основных режимов движения показали, что с точки зрения потерь энергии электродвигатели с пазово-зубцовой геометрией, обес-

печивающей повышенное использование «стали» магнитопровода, не уступают машинам с повышенным использованием «меди» в пазу.

Таблица 5.10. Электромеханические характеристики двигателя лебедки в основных режимах цикла

Тип	Параметр	Разгон	Номинальный режим	Торможение	Удержание	Активное поле
5AF200L8	I_1, A	11,0	8,6	6,1	8,4	4,4
	I_2, A	8,1	5,9	3,4	5,7	0
	$p_{CU1}, Вт$	2487	1541	776	1450	407
	$p_{CU2}, Вт$	993	526	170	490	0
	$p_{\Sigma}, Вт$	3480	2067	946	1940	407
7A200L8K	I_1, A	11,5	8,7	6,2	8,6	4,5
	I_2, A	9,1	6,5	3,8	6,4	0
	$p_{CU1}, Вт$	2788	1628	810	1561	429
	$p_{CU2}, Вт$	1051	539	179	512	0
	$p_{\Sigma}, Вт$	3839	2167	989	2073	429

Запуск электродвигателя лифтовой лебедки в мехатронной системе с векторным управлением может осуществляться двумя способами. Можно сначала произвести намагничивание машины, а затем произвести растормаживание тормоза с одновременной подачей сигнала задания частоты вращения или произвести растормаживание тормоза совместно с подачей управляющего сигнала задания частоты, при этом произойдет запуск и намагничиванием машины. На рис. 5.25 приведены результаты моделирования режима запуска двигателя с выдержкой времени на намагничивание и без нее.

Анализ результатов моделирования показал, что при отсутствии выдержки по времени на намагничивание суммарные электрические потери электродвигателя в режиме пуска увеличиваются до 4100 Вт, что составляет 7%. Равномерность движения в этом случае также ухудшается, а максимальное значение тока статора возрастает на 60%.

В параграфе 5.1 было показано, что режим питания электродвигателя существенно влияет на тепловое состояние элементов электрической машины и его целесообразно оптимизировать. Необходимо отметить, что в режиме запуска такого рода оптимизация невозможна, так как двигатель работает на максимально доступном напряжении, которое обеспечивает безопасный раз-

гон с заданным ускорением. Однако в рамках установившегося режима это как возможно, так и оправдано.

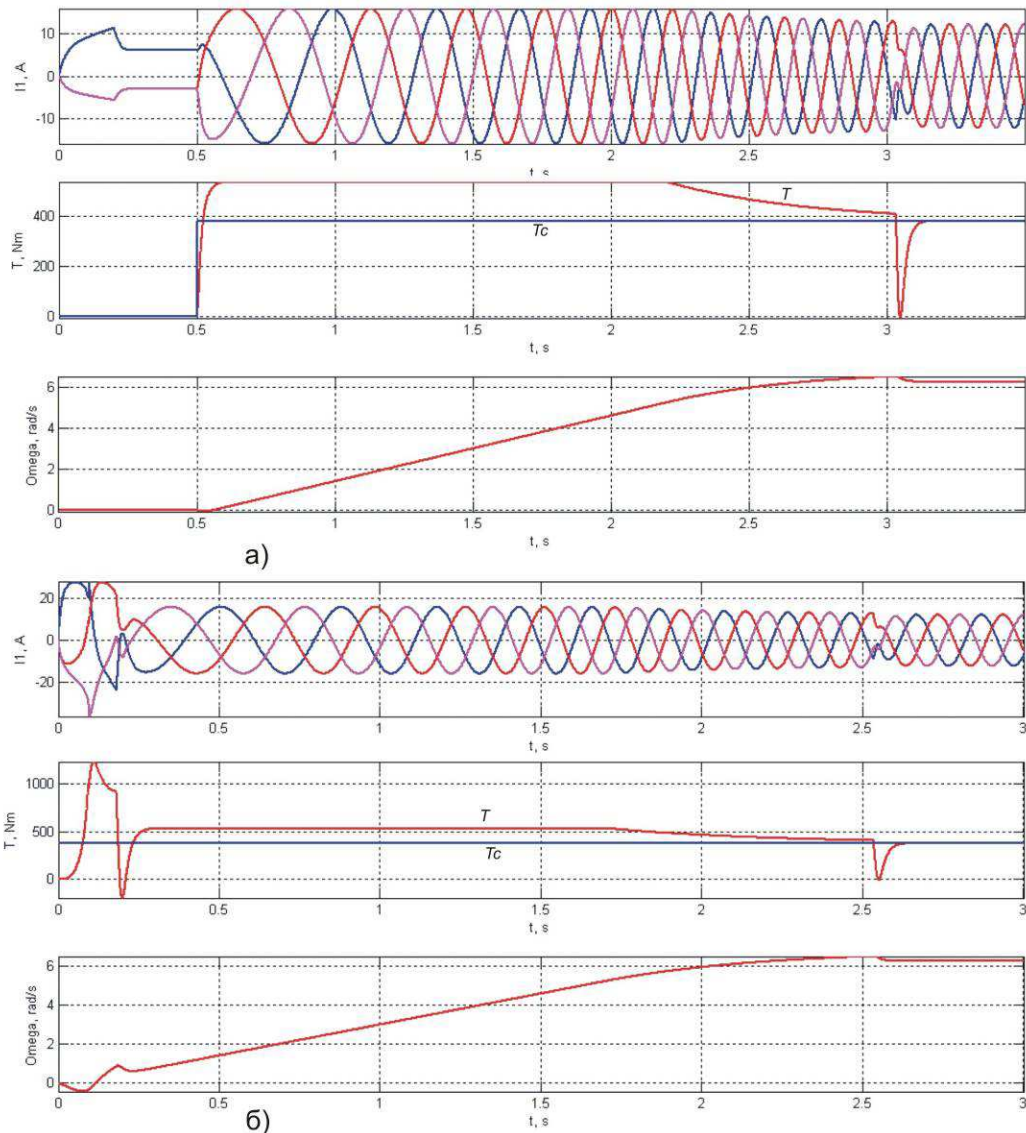


Рис. 5.25. Временные диаграммы пуска электродвигателя 5AF200L8:

- а) при пуске с временной выдержкой на намагничивание;
- б) при пуске без временной выдержки на намагничивание

На рис. 5.26. приведены временные диаграммы цикла работы электродвигателя 7A200LC8K мехатронной системы безредукторного привода лифтовой лебедки с использованием режима оптимального потока в режимах движения, торможения и удержания. На рисунке каждый из них приведен в двух вариантах: максимального и оптимального магнитного потока.

В таблице 5.11 приведены значения усредненных электро механических характеристик и мощности потерь в основных режимах цикла для алгоритма без снижения потока и со снижением потока для электродвигателя 7A200L8K.

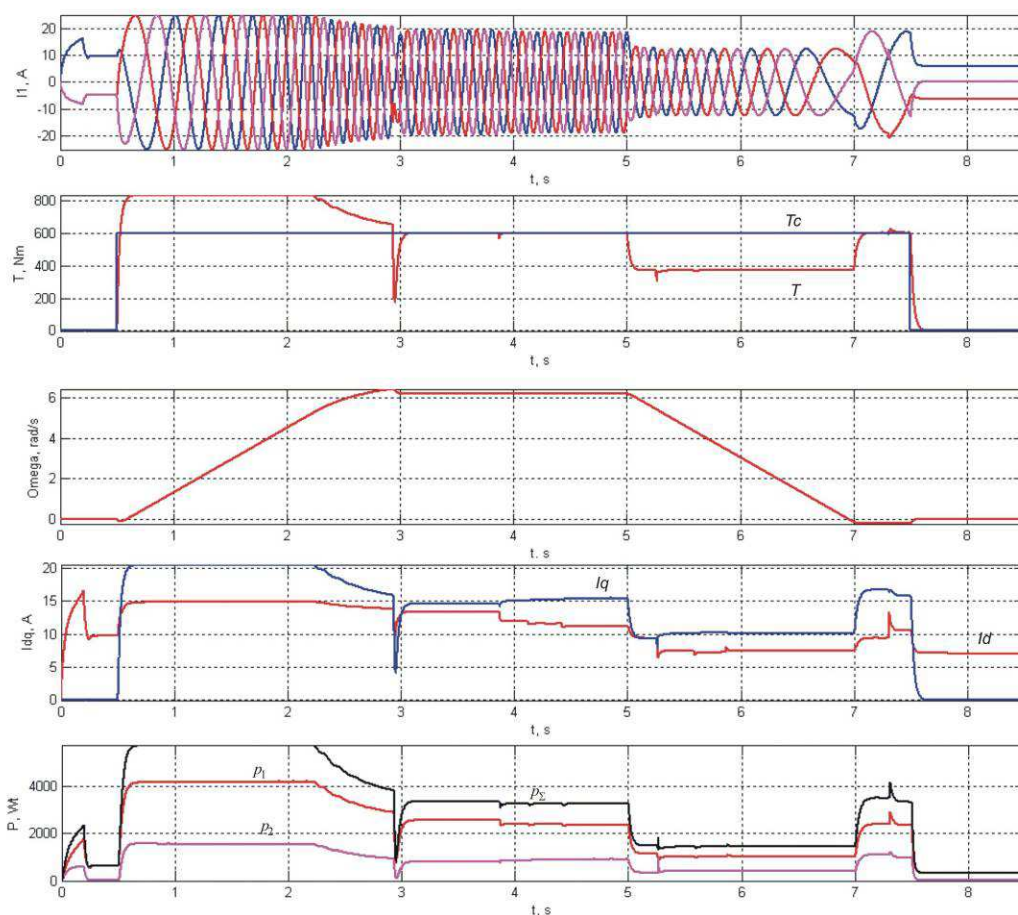


Рис. 5.26. Временные диаграммы основных режимов электродвигателя 7A200LC8K в системе с коррекцией магнитного потока

Таблица 5.11. Электромеханические характеристики двигателя лебедки в основных режимах цикла

Тип	Параметр	Разгон	Номинальный режим	Торможение	Удержание	Активное поле
7A200LC8K	I_1 , A	17,5	14,1	10,5	13,7	7,1
	I_2 , A	12,7	9,4	5,8	9,2	0
	p_{CU1} , Вт	4055	2622	1409	2474	679
	p_{CU2} , Вт	1489	821	303	769	0
	p_{Σ} , Вт	5544	3443	1712	3248	679
7A200LC8K (снижение потока)	I_1 , A	17,5	13,4	8,9	13,2	7,1
	I_2 , A	12,7	9,9	6,7	10,5	0
	p_{CU1} , Вт	4055	2374	1053	2313	679
	p_{CU2} , Вт	1489	889	407	409	0
	p_{Σ} , Вт	5544	3263	1460	2722	679

Использование указанного алгоритма с уменьшением потока позволяет снизить величину превышения температуры обмотки статора на 6% относительно величины, получаемой без использования алгоритма снижения магнитного потока в установившемся режиме.

Таким образом:

1. Разработанные методики оптимизации статических и динамических режимов показали перспективы при их практическом использовании, что проиллюстрировано примером.

2. Исследования показали, что электродвигатели с повышенным использованием «стали» магнитопровода, спроектированные согласно современным тенденциям электромеханики [107, 133], перспективны для использования в частотно-регулируемом электроприводе и мехатронных системах. Они обладают допустимыми показателями максимального момента на низких частотах питания соизмеримыми с аналогичными показателями машин, характеризующимися повышенным использованием «меди» в пазу, спроектированных на основе концепций предыдущих серий [120, 121].

3. Проведены поверочные расчеты и имитационное моделирование мехатронной системы, позволившие определить электродвигатели с повышенным использованием «стали» магнитопровода, как наиболее перспективные, обладающие высокими энергетическими показателями с одновременной экономией дорогого обмоточного провода.

4. Полученные результаты позволили рекомендовать разработанные активные части электродвигателей 7A200L8, для построения на их основе специализируемой частотно-регулируемой серии электродвигателей АЧ, в серийное производство.

Выводы по главе 5

1. Предложенные для оптимизации режимов питания цели и связанные с их достижением функционалы объективно ориентированы на такие качественные показатели эксплуатации электродвигателей, как КПД, превышение температуры обмотки статора и связанной с ней надежностью изоляции обмотки статора, превышение температуры ротора и связанной с ней надежностью подшипниковых опор. Показано, что одновременное достижение нескольких целей возможно только в одной точке скоростной характеристики.

Разработана методика расчета оптимальных параметров питания, обеспечивающих достижение требуемой цели. Показано, что существующие электродвигатели общепромышленных серий разработаны таким образом, что при номинальных параметрах питания ни одна из целей не достигается.

2. Для вентильно-индукторного двигателя предложена новая методика расчета оптимальной зависимости тока задания от угловой координаты, которая, с одной стороны, минимизирует неравномерность момента до конечного значения, что увеличивает срок службы подшипниковых опор электродвигателя, с другой стороны, минимизирует электрические потери, что в данном типе электрической машины обеспечивает минимальное превышение температуры обмотки статора, а следовательно, максимальную надежность изоляции обмотки. Методика расчета построена на основе метода динамического программирования и уравнения Беллмана в дискретной формулировке.

3. На основе анализа решений, получаемых при расчете оптимальной зависимости тока задания от угловой координаты, сформулированы положения нелинейного токового управления моментом вентильно-индукторного двигателя, что позволило:

- сформулировать требования к конструкции вентильно-индукторного двигателя, при реализации которой можно получить равномерный момент.
- разработать способы расчета упрощенных квази-оптимальных зависимостей тока задания от частоты угловой координаты, подходящие для технической реализации.

4. Показано, что одним из важных режимов эксплуатации электродвигателей являются переходные режимы, связанные с изменением частоты вращения. В этих режимах возможна экономия энергии за счет оптимального подбора режима разгона, алгоритма управления, коэффициентов регулятора частоты вращения. Сделан вывод о необходимости анализа данных режимов, с точки зрения потерь энергии, при энергетическом расчете и проектировании мехатронных систем. Предложена методика выбора коэффициентов ре-

гулятора частоты вращения, основанная на использовании имитационного моделирования и полученных результатов.

5. На примере центробежных насосов выявлены причины, определяющие экономию электроэнергии, получаемую при использовании регулируемого электропривода и мехатронных систем в приводах с циклической нагрузкой. Показано, что энергосбережение электроприводов с регулированием частоты происходит в режимах частичной нагрузки. При этом мехатронные системы обеспечивают большие показатели энергосбережения в широком диапазоне изменения нагрузки за счет специальной активной части машины, кроме того, электродвигатели для мехатронных систем обладают высоким потенциалом материалосбережения при их производстве.

6. На примере разработки серии электродвигателей для привода безредукторных лифтовых лебедок показана процедура оптимизации энергетических характеристик мехатронной системы в статических и динамических режимах, полученные технические решения внедрены в промышленное производство ПАО «НИПТИЭМ», ООО «ПК «ВЭМЗ» и используются в отечественных лифтах различных городов.

ГЛАВА 6. КОНСТРУИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Важность конструктивных деталей и оболочки электрической машины сложно переоценить, так как именно она определяет:

- метод и параметры охлаждения машины, степень защиты;
- механическую прочность к внешним воздействиям, климатическое исполнение,

а также оказывает существенное влияние на:

- добавочные магнитные потери в высоконагруженных, с точки зрения магнитного потока, машинах;
- вес и габариты машины, надежность обмоток и подшипниковых опор;
- себестоимость электродвигателя и машинной части мехатронной системы.

Основные положения конструирования электрических машин хорошо проработаны и изложены в соответствующей литературе [33, 58, 186, 191]. С точки зрения оперативности разработки электрических машин для мехатронных систем, хорошие результаты дает использование модульного принципа конструирования специального исполнения машин, основные положения которого были разработаны группой специалистов ПАО «НИПТИЭМ» под руководством А.М. Зайцева [33, 211, 212].

Основа этого принципа заключается в том, что конструкция специальной электрической машины упрощается и приводится к одному из вариантов, показанных на рис. 6.1. При этом максимально используются элементы серийно выпускаемых общепромышленных двигателей, а также ряд унифицированных деталей, таких как: электромагнитный тормоз, датчик частоты вращения, вентилятор охлаждения, кожух вентиляционного узла. Использование данного подхода при проектировании позволяет быстро и качественно разрабатывать и производить специальные электрические машины с низкой стоимостью, однако связано с использованием технологий серийного производства электродвигателей.

Модульный принцип конструирования двигателей специального исполнения			
O	O+T		
O+B	O+B+T	O+B+Д	O+B+Д+T
O+BH	O+BH+T	O+BH+Д	O+BH+Д+T
O – общепромышленный электродвигатель T – электромагнитный тормоз; Д – датчик частоты вращения B – вентилятор ; BH – вентилятор наездник			

Рис. 6.1. Иллюстрация модульного принципа конструирования

Использование указанного принципа дает хороший практический результат при минимальных затратах на оснастку производства в задачах разработки двигателей для мехатронных систем и поэтому оправдано. Однако, как показала практика, в ряде случаев использование этого подхода связано с некоторыми эффектами, которым будет уделено внимание в данном разделе работы.

6.1 Исследование влияния конструкции электродвигателя на потери

При разработке электрических машин с высоким использованием материалов приходится нагружать сердечники статора и ротора магнитным потоком до высоких значений индукции в зубцах и ярме. В результате значения магнитных потерь таких электродвигателей оказываются выше расчетных, а зависимость магнитных потерь от квадрата магнитной индукции, следовательно, квадрата напряжения статора в зоне завышенных напряжений, существенно отличается от линейной зависимости. При этом, с одной стороны, разработка двигателей с высоким использованием активных материалов без учета увеличения магнитных потерь становится невозможна из-за перегрева элементов машины свыше допустимого. С другой стороны, методики учета обозначенного эффекта в литературе отсутствуют, а завышение величины удельных потерь, на всякий случай, при проектировании электрических машин с высокими удельными показателями недопустимо. Поэтому необходимо разработать методику учета увеличения магнитных потерь и проверить ее экспериментально.

Целесообразно проводить разработку методики с анализа самого явления и определения причин, его вызывающих. Для этого была проведена работа по анализу и обобщению результатов опыта холостого хода электродвигателей производства ООО «ПК«ВЭМЗ», ПАО «НИПТИЭМ», ООО «Русэлпром-СЭЗ», *Siemens*, *ABB*. Все испытания были проведены в лабораториях испытательного центра НИПТИЭМ с помощью сертифицированного оборудования и в соответствии с ГОСТ 7217-87 «Машины электрические вращающиеся. Двигатели

асинхронные. Методы испытаний» [50]. Всего в рамках анализа было исследовано более 100 протоколов испытаний. Как правило, характер получаемой зависимости имел вид, представленный на рис. 6.2.

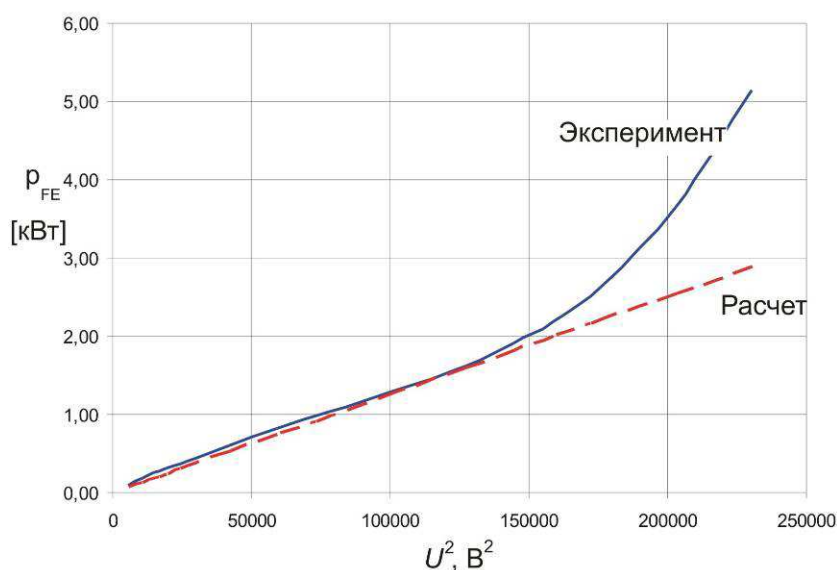


Рис. 6.2. Зависимость мощности магнитных потерь от квадрата напряжения электродвигателя 5АМ280М4 производства «ВЭМЗ»

Предпосылки для такого поведения зависимости мощности магнитных потерь от квадрата напряжения отсутствуют, так как в соответствии с современными представлениями о магнитных потерях их мощность описывается с помощью выражения [236-238]:

$$p_{FE} = p_{FEh} + p_{FEe} + p_{FEa} = k_h B^\alpha + k_e B^2 f^2 + k_a B^{1.5} f^{1.5}, \quad (6.1)$$

где p_{FE} – мощность магнитных потерь; p_{FEh} , p_{FEe} – составляющие потерь на гистерезис и вихревые токи; p_{FEa} – доменная составляющая вихревых токов; k_h , k_e – коэффициенты увеличения потерь от гистерезиса и вихревых токов; $\alpha \approx 1 < 2$ – показатель степени при индукции, используемый для расчета потерь от гистерезиса; k_a – коэффициент увеличения потерь от доменной составляющей вихревых токов; B – амплитуда магнитной индукции в элементах магнитопровода.

В асинхронных электродвигателях на холостом ходу величина индукции пропорциональна напряжению питания, поэтому расхождение мощности магнитных потерь от расчетного значения, представляющего зависимость суммарных потерь от квадрата напряжения, не объясняется существующим представлением о магнитных потерях. В случае, когда эффект увеличения

магнитных потерь не проявляется, зависимость мощности магнитных потерь от квадрата напряжения линейна и имеет вид, показанный на рис. 6.3.

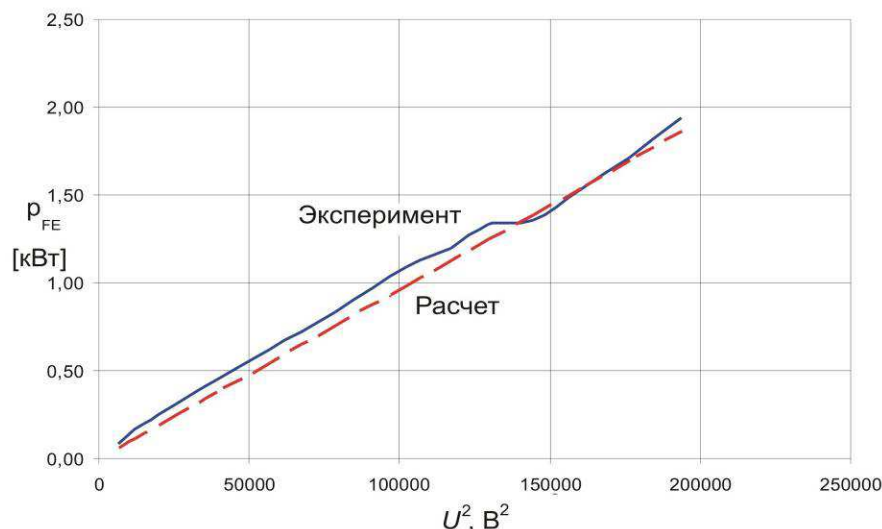


Рис. 6.3. Зависимость мощности магнитных потерь от квадрата напряжения электродвигателя 7AVER280M4ie2

В основу анализа опыта холостого хода по данным, взятым из протоколов испытаний электродвигателя, была положена следующая методика:

1. На основании данных опыта холостого хода из мощности потерь холостого хода в соответствии с ГОСТ 7217-87 и по измеренным значениям тока холостого хода, механическим потерям, коэффициенту мощности, активному сопротивлению обмотки статора, выделяются магнитные потери.

2. Проводится построение зависимости мощности магнитных потерь от квадрата напряжения. В случае, если имеется возможность проведения поверочного электромагнитного расчета исследуемого электродвигателя, проводится расчет значений величины индукции в зубцах статора и ярме статора.

3. Проводится аппроксимация линейного участка зависимости мощности магнитных потерь от квадрата напряжения и определяется точка начала отклонения фактической кривой от линейной зависимости.

4. С помощью поверочного электромагнитного расчета в точке расхождения зависимостей определяются:

- фактические удельные потери, соответствующие линейному участку зависимости;
- соотношение между величинами магнитных потерь в зубцах статора и ярме.

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие заключения об эффекте увеличения мощности магнитных потерь, который для краткости назван «аномальным»:

1. Увеличение магнитных потерь не зависит от технологии производства сердечников электрических машин и характерно для двигателей любого производителя. На рис. 6.4, 6.5. приведены зависимости, полученные при анализе протоколов испытаний электродвигателей зарубежных производителей – лидеров европейского электромашиностроения концернов *Siemens* и *ABB*.

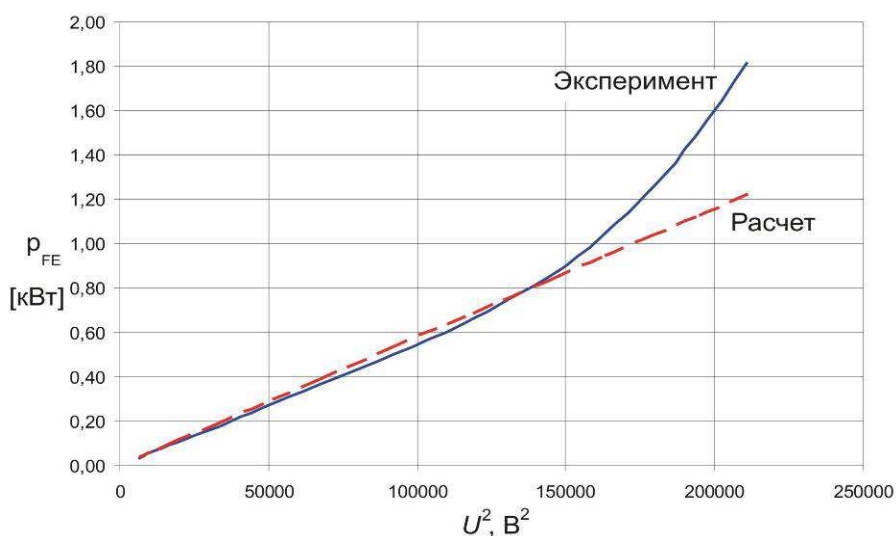


Рис. 6.4. Зависимость мощности магнитных потерь от квадрата напряжения электродвигателя 1LA5223-6 производства компании *Siemens*

2. «Аномальное» увеличение магнитных потерь от расчетных значений, полученных на основе традиционной методики, может быть значительно, более 500%. Это означает, что при разработке крупных электрических машин, у которых магнитные потери вносят существенный вклад в величину превышения температуры обмотки статора и КПД машины, неучет данного эффекта приведет к значительному расхождению между опытом и расчетом, что увеличит затраты времени и ресурсов на проектирование.

3. Эффект «аномального» увеличения магнитных потерь связан с конструкцией и материалом оболочки электродвигателя и величиной индукции в спинке статора. На рис. 6.6 приведены зависимости измеренных магнитных потерь в двигателе с полюсно-переключаемой обмоткой статора, что позволяет на одной электрической машине иметь перегруженное по магнитному потоку ярмо статора в

режиме $2p=2$ и недогруженное при $2p=4$. Индукция в зубцах при этом одинакова.

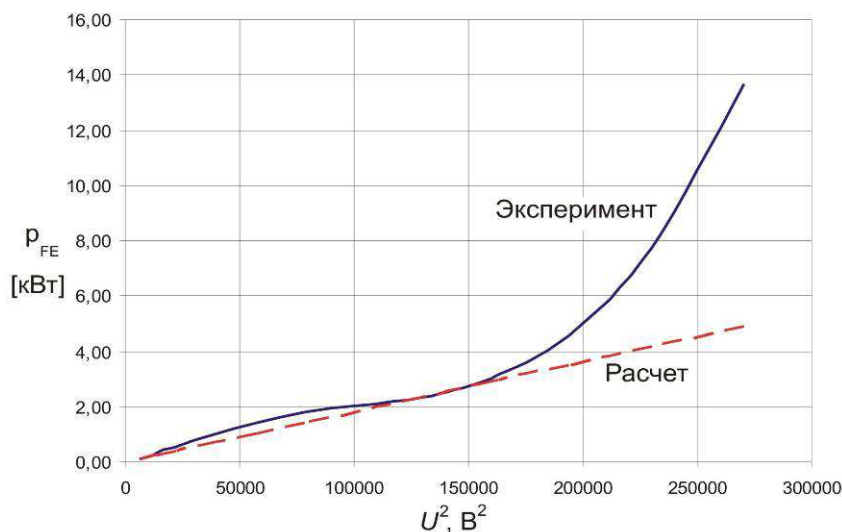


Рис. 6.5. Зависимость мощности магнитных потерь от квадрата напряжения электродвигателя M2BAT355S4 производства компании ABB

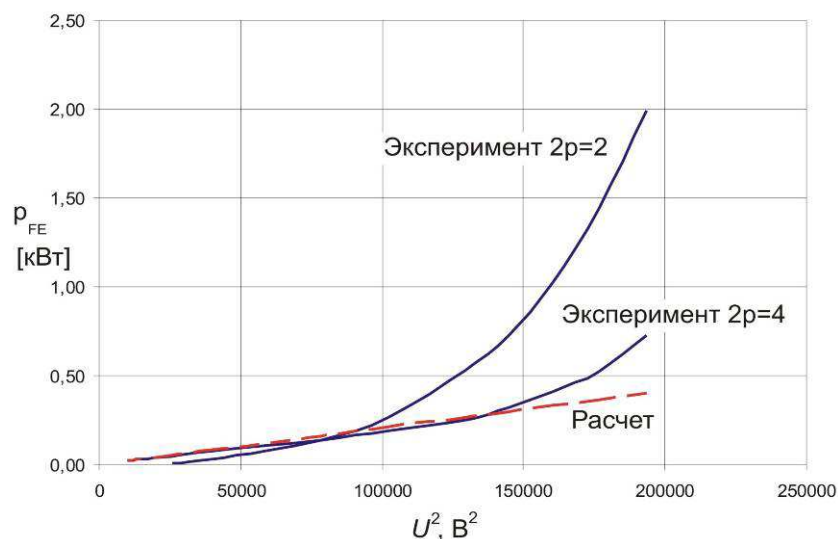


Рис. 6.6. Зависимость мощности магнитных потерь от квадрата напряжения полюсно-переключаемого электродвигателя AIP160S2/4

4. «Аномальное» увеличение магнитных потерь отсутствует в конструкциях электрических машин с сердечником, изолированным от оболочки значительным воздушным промежутком. На рис. 6.7 показана зависимость, характерная для двигателя, у которого оболочка – станина отстоит от сердечника на существенное расстояние, через которое осуществляется обдув воздухом активной части машины. На рис. 6.8 представлены зависимости мощности магнитных потерь от квадрата напряжения, полученные при проведении эксперимента, в котором для проверки гипотезы влияния воздушного

промежутка между станиной и сердечником было изготовлено два одинаковых электродвигателя, станина одного из которых была запрессована на сердечник статора, а у другого сердечник отстоял от станины на 5 мм. Результат выявил влияние воздушного промежутка на величину потерь.

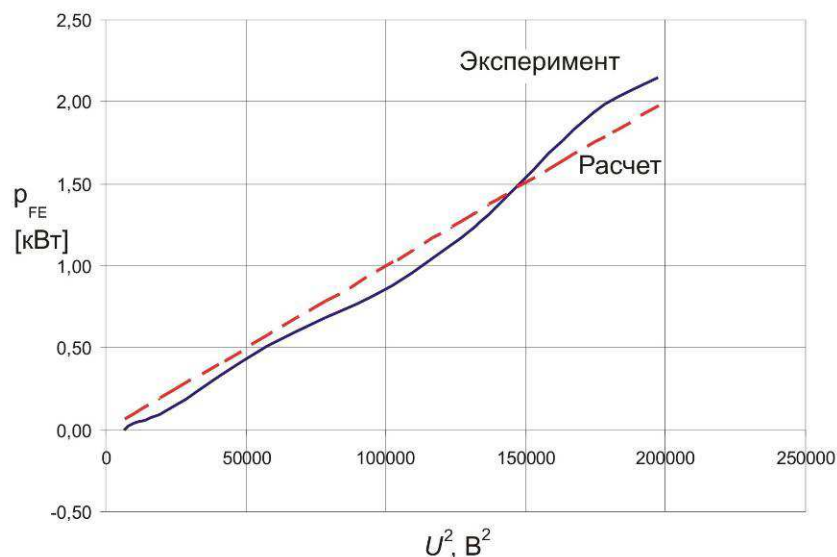


Рис. 6.7. Зависимость мощности магнитных потерь от квадрата напряжения двигателя АНЭ225L4 (запрессовка пакета на внутренних ребрах станины)

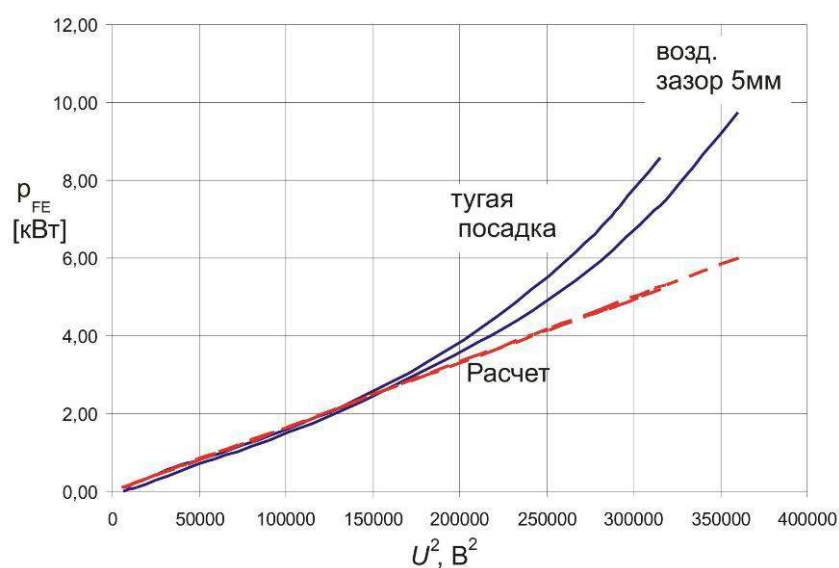


Рис. 6.8. Зависимость мощности магнитных потерь от квадрата напряжения электродвигателя ТАДВМ280-4 в стальной станине

Кроме того, в результате экспериментальных исследований было выявлено существенное влияние материала оболочки: алюминий, чугун, сталь — на величину «аномального» увеличения мощности потерь в сердечнике статора, при этом было установлено, что наименьшее влияние характерно для материалов, имеющих меньшую магнитную проводимость. Эксперименталь-

но установлено, что наибольшее увеличение магнитных потерь характерно для стальных оболочек, которые наиболее часто используются в специальных электрических машинах. На рис. 6.9, в качестве примера, приведены зависимости одинаковых с токи зрения активных частей электрических машин, отличающихся материалом оболочки: 5АМХ – алюминиевая станина, АИР – чугунная. Аналогичное исследование было проведено для электродвигателей, станина которых изготовлена из стали и чугуна.

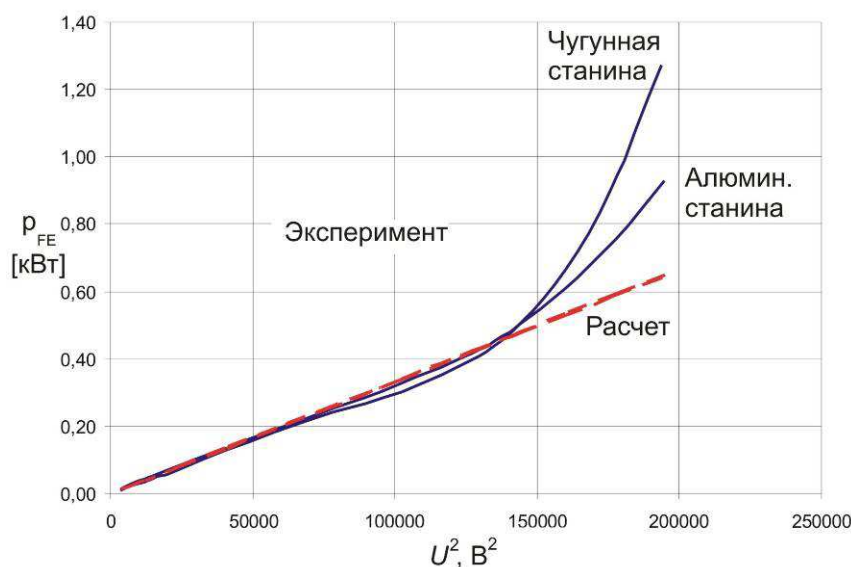


Рис. 6.9. Зависимость мощности магнитных потерь от квадрата напряжения для электродвигателей АИР180М4, 5АМХ180М4

5. «Аномальное» увеличение магнитных потерь проявляется при значениях индукции в ярме статора более 1,65 Тл для чугунных оболочек, 1,45 Тл для стальных оболочек.

Обобщением проанализированных результатов стало заключение о природе возникающего явления.

6 «Аномальное» увеличение мощности магнитных потерь связано с эффектом рассыщения спинки статора, когда при насыщении ее материала часть магнитного потока вытесняется в оболочку, не имеющую шихтовки. Возникающие при этом вихревые токи приводят к увеличению магнитных потерь [83, 224], таким образом, увеличение магнитных потерь вызвано появлением добавочных потерь энергии в конструктивных элементах за счет вытеснения потока из ярма статора в станину [60].

Для подтверждения сформулированной гипотезы, а также для изучения влияния типа материала оболочки на мощность магнитных потерь была разработана специальная экспериментальная станина, показанная на рис. 6.10., позволяющая проводить исследование зависимостей магнитных потерь при различных материалах оболочки. В экспериментальную станину была запрессована активная часть полюсно-переключаемого электродвигателя, характеризующаяся высокими индукциями в ярме статора при низких индукциях в зубцах в режиме $2p=2$ и низкими индукциями в ярме статора при высоких индукциях в зубцах в режиме $2p=4$. Кроме того, были изготовлены аналогичные электродвигатели в оболочках из алюминиевого сплава АК7мц2 и чугуна. Для визуального наблюдения момента возникновения эффекта вытеснения магнитного потока на одно из ребер станины был установлен бесконтактный измеритель тока.

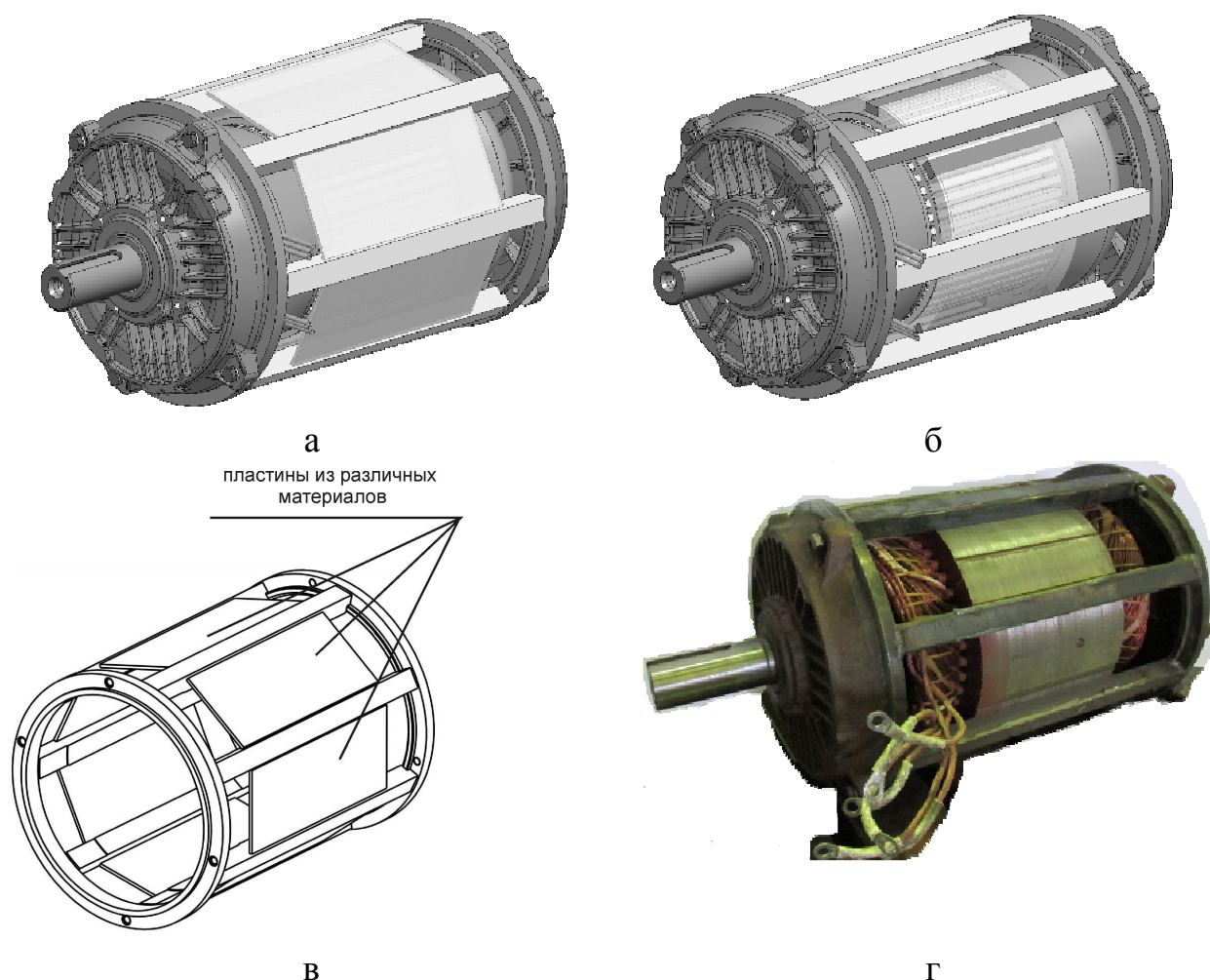


Рис.6.10. Общий вид двигателей с экспериментальной станиной для исследования эффекта увеличения магнитных потерь:

- а) модель с пластинами; б) модель без пластин;
- в) общий вид станины г) фотография образца

В таблице 6.1. приведены значения тока, протекающего в ребре оболочки, измеренные при номинальном напряжении питания с установленными и снятыми стальными перемычками (пластинами). Результаты показали, что ток при имеющихся перемычках существенно возрастал.

Таблица 6.1. Значения тока в ребре при номинальном напряжении

№ п/п		С пластинами	Без пластин
	Полюсность обмотки	Ток в ребре станины, А	Ток в ребре станины, А
1	$2p=2$	8	5
2	$2p=4$	160	49

Проведенные экспериментальные исследования [49] подтвердили ранее сделанную гипотезу о причинах возникновения эффекта увеличения магнитных потерь и хорошо согласуются с результатами моделирования электромагнитных процессов. На рис. 6.11 и рис. 6.12 показаны экспериментальные зависимости магнитных потерь от квадрата напряжения питания на частоте 50Гц.

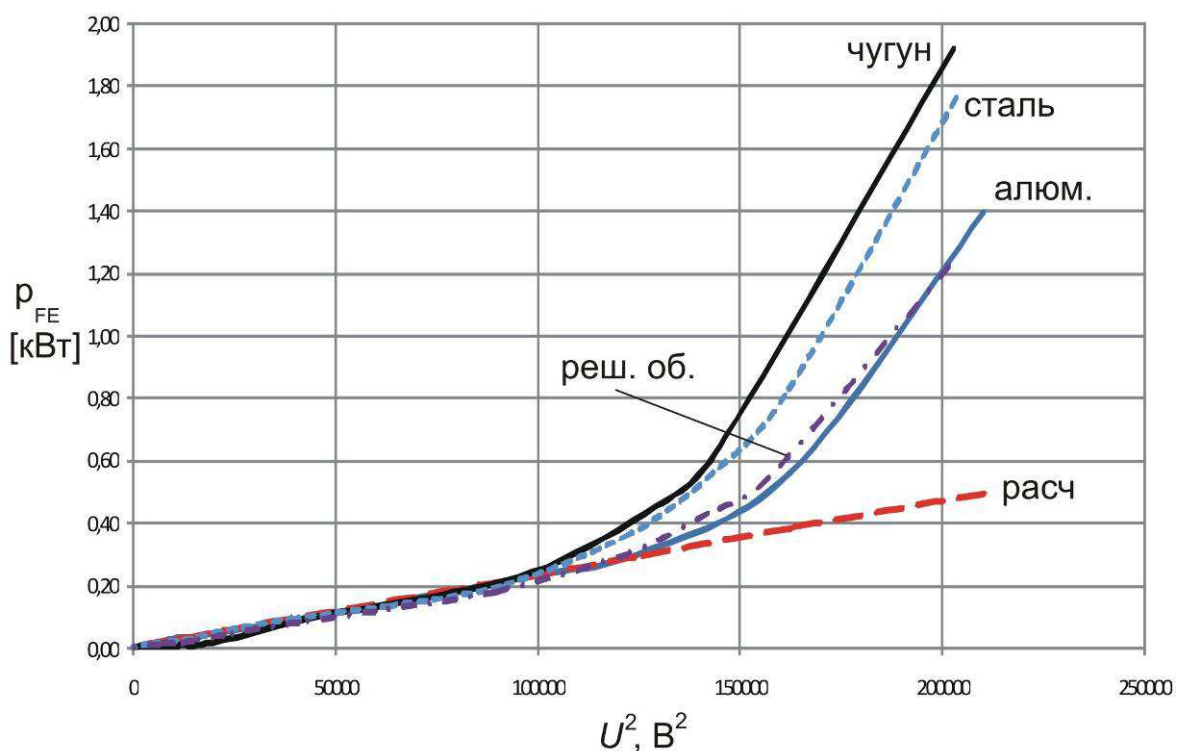


Рис. 6.11. Зависимость мощности магнитных потерь от квадрата напряжения, измеренная на электродвигателях в экспериментальных оболочках:
 реш. об. – экспериментальная оболочка из стальной решетки без пластин;
 чугун – станина из чугуна; алюм. – станина из алюминия; сталь – экспериментальная оболочка с пластинами и ребрами из стали

Для удобства анализа зависимости приведены для двух диапазонов изменения действующего значения напряжения рис. 6.11 до 460В, что соответствует диапазону до 211600 В², и до 660В на рис. 6.12, что соответствует диапазону 435600 В².

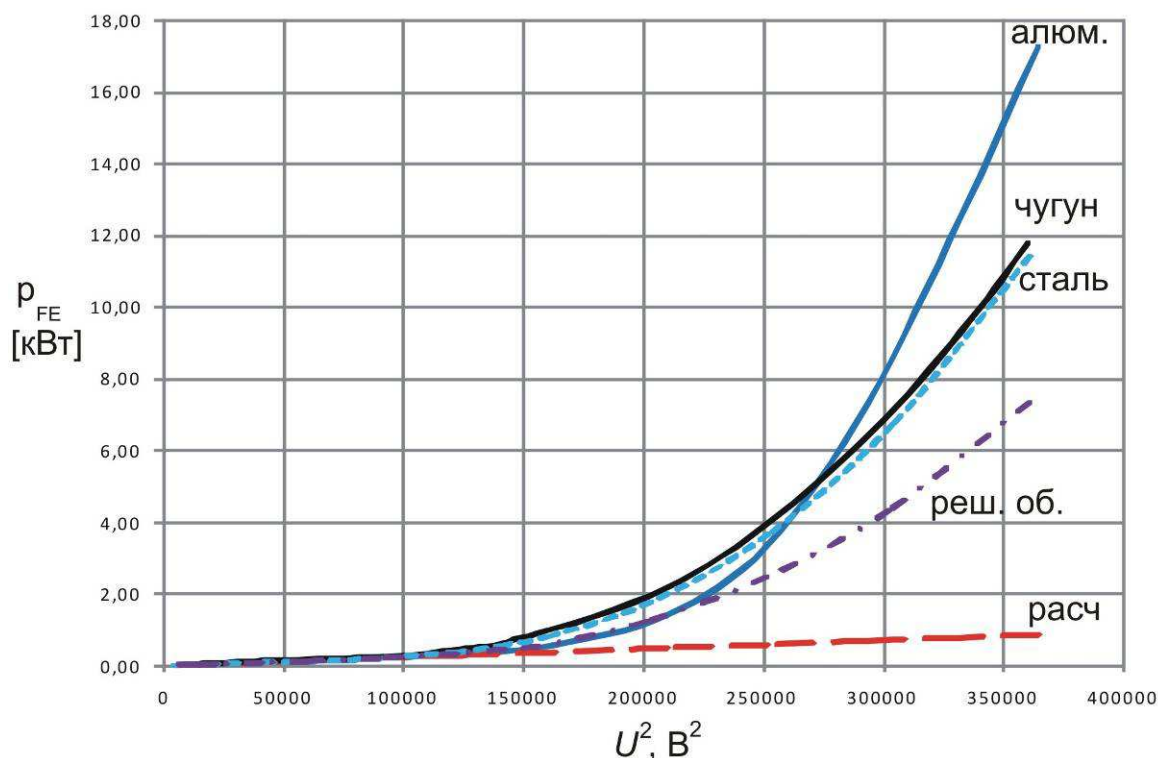


Рис. 6.12. Зависимость мощности магнитных потерь от квадрата напряжения, измеренная на электродвигателях в экспериментальных оболочках

Анализ зависимостей показал, что минимальное вытеснение магнитного потока в оболочку соответствует оболочкам из неферромагнитных материалов. При высоких напряженностях магнитного поля вытеснение происходит как в воздух, так и в любой другой материал. Минимальные значения мощности добавочных потерь в оболочке при эксперименте были получены при решетчатой станине, что объясняется минимальным количеством ферромагнитных и электропроводящих элементов корпуса. Интересным эффектом стало наблюдение зависимости добавочных потерь в оболочке у машин с алюминиевой станиной значения, которые превышали магнитные потери при использовании станин других типов при высоких значениях напряженности магнитного поля. Для выяснения причин указанного поведения добавочной составляющей магнитных потерь было проведено численное моделирование

методом конечных элементов с учетом эффектов вытеснения тока в сплошных проводящих средах. На рис. 6.13, 6.14 приведены картины магнитного поля, полученные при моделировании. В исследовании изучалось влияние напряженности магнитного поля на его глубину проникновения в оболочку для различных материалов, также измерялись удельные потери в станине.

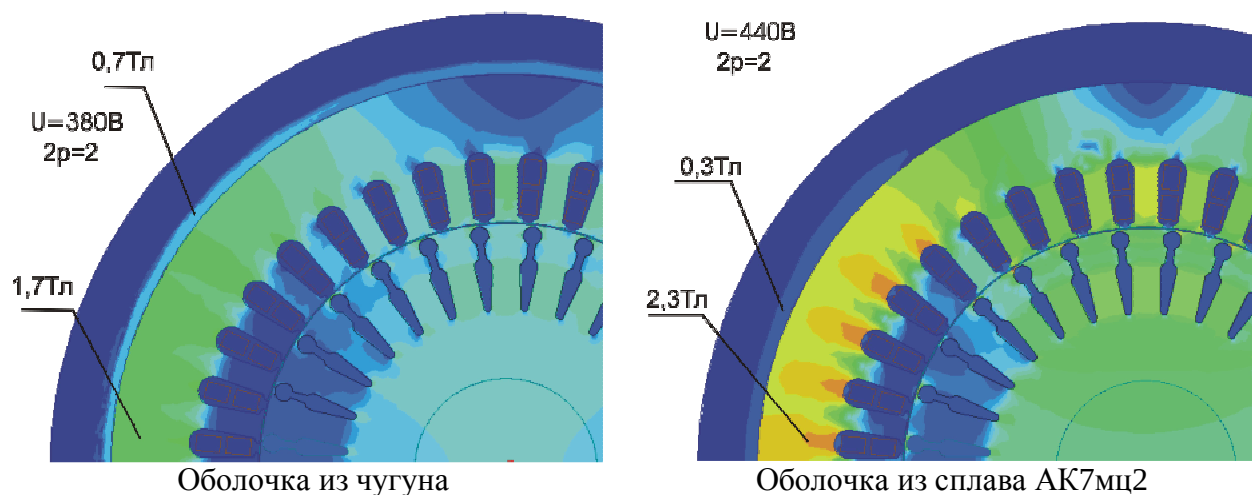


Рис. 6.13. Картины магнитного поля с вытеснением в станину из чугуна и алюминиевого сплава

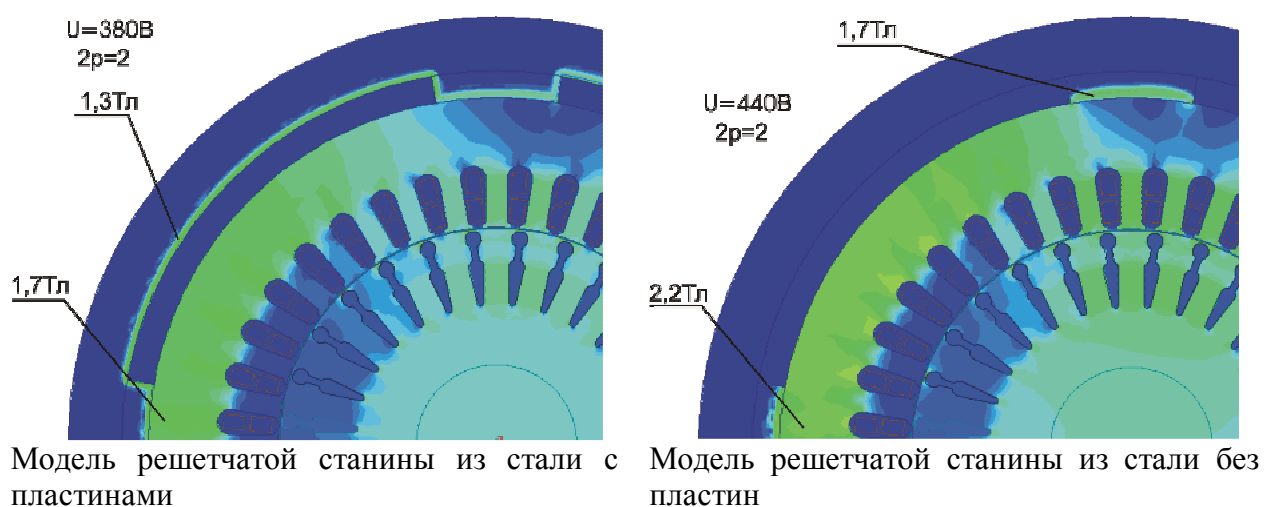


Рис. 6.14. Картины магнитного поля с вытеснением в решетчатую станину из стали

Анализ результатов исследования показал, что при насыщении нелинейных магнитных сред (стали и чугуна) глубина проникновения магнитного поля в оболочку снижается. Этот эффект не наблюдается в станинах из диамагнетиков. Поэтому эквивалентное электрическое сопротивление вихревых токов в станинах из ферромагнетиков с повышением напряженности возрастает.

Минимальные значения вытеснения магнитного поля, значения вихревых токов, добавочных потерь в оболочке были получены при моделировании станин из титана и нержавеющей, немагнитной стали.

Результаты, полученные в ходе экспериментальных и аналитических исследований, позволили разработать методику вычисления мощности потерь в оболочке электрической машины, изготовленной из чугуна, алюминия и других материалов. Методика была ориентирована на вычисление добавочных потерь в низковольтных асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором при нагрузке сердечника статора индукцией до 2 Тл. Она приведена и опробована в двух вариантах. На основе коэффициентов увеличения потерь в ярме статора. На основе непосредственного вычисления глубины проникновения магнитного потока в оболочку.

Вариант 1. Коэффициент увеличения потерь в ярме статора приведен в таблице 6.2. Необходимо отметить, что показанный коэффициент повышает величину потерь только в ярме статора. Таким образом, что мощность магнитных потерь в сердечнике статора должна быть вычислена на основе формулы:

$$p_{FE} = k_{add} p_{FEj1} + p_{FEz1}, \quad (6.2)$$

где p_{FEj1} – мощность потерь в ярме, p_{FEz1} – мощность потерь в зубцах статора, рассчитанные по методике поверочного электромагнитного расчета [158]; k_{add} – коэффициент увеличения потерь из таблицы 6.2.

Таблица 6.2. Зависимость коэффициента увеличения добавочных потерь в оболочке от индукции

№ п/п	Индукция в ярме статора, Тл	Индукция в зубцах статора, Тл			
1		1,00	1,80	1,85	1,90
2	1,2	0,95	0,95	1,00	1,00
3	1,3	1,00	1,05	1,05	1,10
4	1,4	1,05	1,10	1,10	1,15
5	1,5	1,10	1,15	1,15	1,20
6	1,6	1,15	1,30	1,30	1,30
7	1,7	1,80	2,10	2,10	2,10
8	1,8	3,20	3,10	3,10	3,10
9	1,9	5,90	5,80	5,80	

Примечание: коэффициент увеличения потерь k_{add} находится на пересечении ячеек индукции в ярме статора и индукции в зубцах статора.

Разработанный вариант методики учета добавочных потерь в станине является уточнением для методики поверочного электромагнитного расчета по ОСТ.16-0.801.302-85 [158].

Вариант 2. Методика, основана на вычислении глубины проникновения магнитного поля, более универсальна и дает хороший практический результат в широком диапазоне исследований. Вычисление мощности добавочных потерь в оболочке на ее основе проводится с помощью формул:

$$\Delta_F = \sqrt{\frac{1}{\sigma \mu \mu_0 \pi f_1}}, \quad (6.3)$$

$$p_{add} = \frac{H_{F1}^2}{\Delta_F \sigma} D_{a1} L_1, \quad (6.4)$$

где Δ_F – глубина проникновения магнитного поля в оболочку, обусловленная скин-эффектом; σ – электрическая проводимость материала оболочки электродвигателя; μ – относительная магнитная проницаемость материала оболочки; H_{F1} – напряженность магнитного поля в станине. Из формул (6.3), (6.4) видно, что увеличение магнитных потерь обусловлено вихревыми токами в поверхностном слое оболочки.

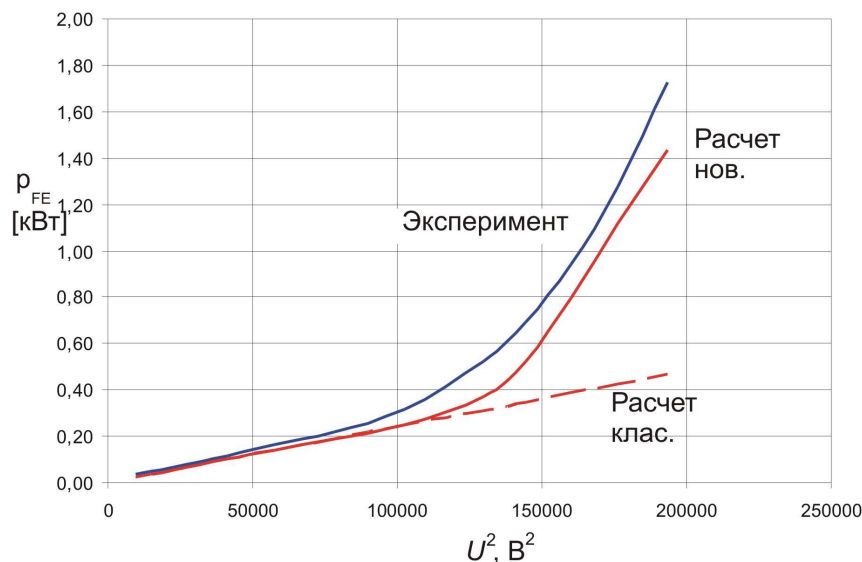


Рис. 6.15. Зависимость мощности магнитных потерь от квадрата напряжения для электродвигателя 7AVER160M2/4 в чугунной станине

Второй вариант методики на основе использования формул (6.3), (6.4) также был добавлен в методику поверочного электромагнитного расчета. Верификация полученных значений показала, что предложенное уточнение по-

звolyет снизить погрешность вычисления магнитных потерь в высоконагруженных электрических машинах с 500% до 15% для двигателей с магнитным материалом оболочки и с 250% до 30% для электродвигателей с немагнитным материалом оболочки. Проверка была проведена на 10 электродвигателях. На рис. 6.15, 6.16 приведено сопоставление расчетных и экспериментальных значений мощности потерь. Получаемые остаточные погрешности обусловлены неточностями при вычислении величины напряженности магнитного поля в оболочке, отклонениями в значениях электрических и магнитных свойств материалов.

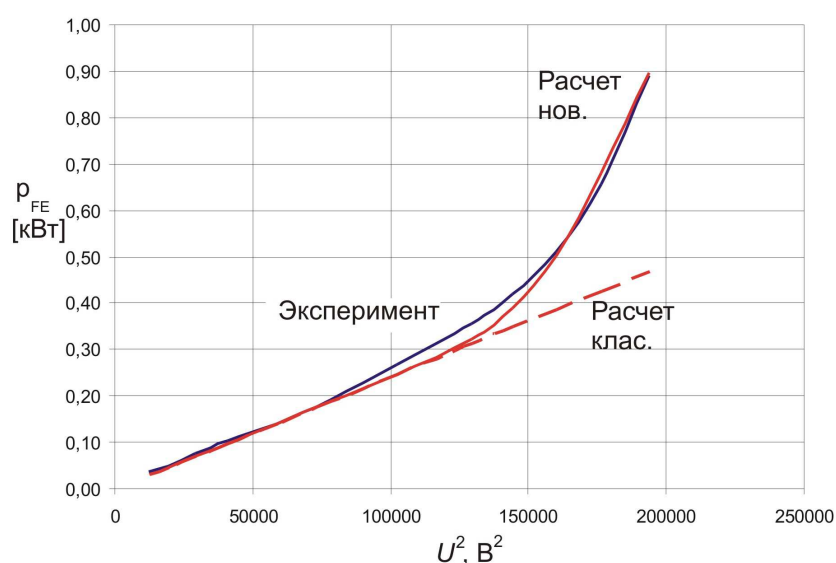


Рис. 6.16. Зависимость мощности магнитных потерь от квадрата напряжения для электродвигателя 7AVER160M2/4 в алюминиевой станине

Введенное уточнение расчета мощности магнитных потерь в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором позволило снизить погрешность при расчете КПД в высоконагруженных машинах на величину до 2%.

6.2 Оптимальное конструирование электродвигателей для мехатронных систем

Оптимальное конструирование специальных электродвигателей для мехатронных систем – важное направление совершенствования последних. Поэтому отыскание новых подходов разработки конструктивной части машины, в том числе с использованием ранее упоминаемого модульного прин-

ципа проектирования [33], актуально. Необходимо отметить, что исторически значительные усилия разработчиков направлены на оптимальное проектирование активной части электрической машины. При этом принято в качестве целевой функции выбирать стоимость изготовления обмотанных сердечников статора и ротора [7, 108, 110, 215]. Однако полная стоимость изготовления электродвигателя определяется не только стоимостью активных частей, но и стоимостью оболочки и конструктивных деталей, вклад которых в общую себестоимость машины может быть не только сравним с ценой активных частей машины, но превосходить ее, что особенно характерно для электродвигателей, используемых в мехатронных системах.

Решение такого рода задач традиционно основано на последовательном переборе вариантов конструкторских решений с одновременной оценкой стоимости их производства без использования каких-либо методов оптимизации. Применение методов математического программирования, в частности методов дискретного программирования [103, 105], может быть использовано при оптимизации конструкции электрической машины.

Поясним особенности применения метода дискретного программирования в задачах конструирования оболочки электрической машины.

Применение метода необходимо начать с разработки графа конструирования электрической машины, с помощью которого можно представить сборку специального электродвигателя. Этот граф должен отражать последовательности сборки основных деталей машины: сердечник, станина, щиты, вал, вентиляционный узел, датчики, тормоз, терминальные устройства и специальные конструктивные элементы с учетом их вариативности. Например, специальная станина, серийная станина, тормоз дисковый, тормоз барабанный и другие. При этом необходимо, чтобы добавление каждой новой детали приводило к изменению свойств изделия, в противном случае необходимо объединять детали в группы. Например, сборка сердечника и станины может быть охарактеризована новым свойством – размещение в оболочке, а сборка электродвигателя с тормозным устройством может быть охарактеризована

новым свойством – обеспечение торможения. Следует отметить, что два варианта одного элемента конструкции могут давать разное количество свойств, иначе говоря, можно достичь необходимых характеристик изделия при разном количестве элементов, из которых оно собирается. Например, используя специальные элементы конструкции машины, можно собрать изделия с меньшим количеством деталей, чем при использовании серийных элементов и дополнительных переходных элементов.

На рис. 6.17 показано одно из возможных представлений графа конструирования в виде сетчатого графа. На нем по оси аргумента показаны детали, входящие в конструкцию изделия, уровень графа отражает свойства изделия. Стрелками показаны допустимые сборочные операции. Сборка начинается в начале графа, заканчивается в его конце. Допустимой считается сборка, при которой изделие приобретает необходимые n свойств и в которой использовано не более одного варианта элемента. Таким образом, процесс конструирования специального электродвигателя сводится к многошаговому управлению из множества определенного на графе. Каждое управление имеет свою цену.

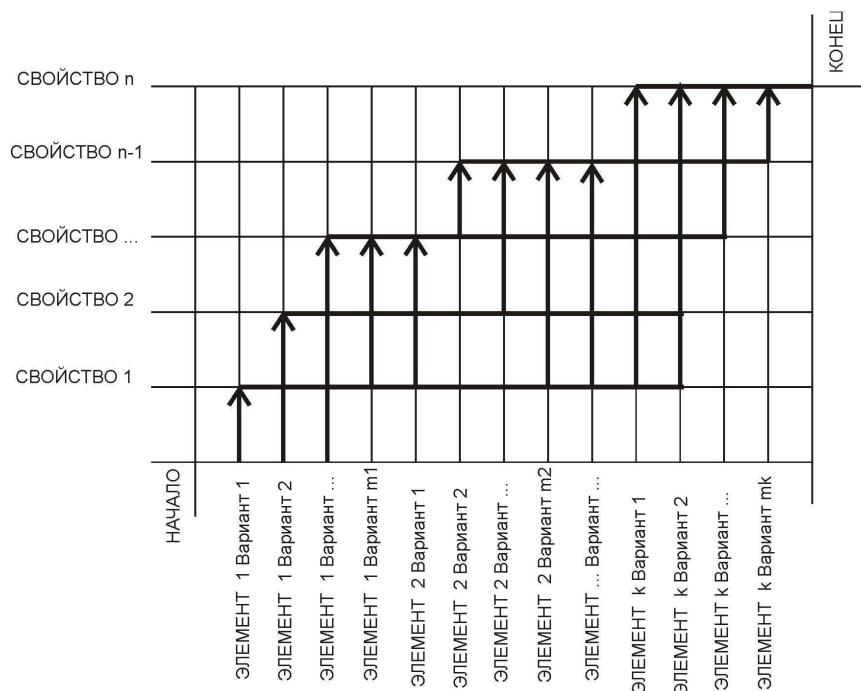


Рис. 6.17. Общий вид графа ветвления задачи конструирования

Цена одного шага управления, а следовательно, затраты на изготовление элемента конструкции вычисляются по формуле:

$$Q = C_1 + C_2 + C_3 + C_4, \quad (6.5)$$

где C_1 – себестоимость затрат труда по производству элемента конструкции; C_2 – себестоимость материалов и комплектующих, из которых изготавливается элемент конструкции; C_3 – стоимость электроэнергии, потраченной на производство элемента конструкции; C_4 – стоимость трудозатрат по доработке других элементов конструкции.

Решение задачи конструирования может быть найдено на основе принципа и уравнения Беллмана:

$$\begin{aligned} F_k(x, u) &= Q(x, u) + f_{k-1}(x'); \\ f_k(x) &= \min_U F_k(x, u), \end{aligned} \quad (6.6)$$

где x – текущий уровень изделия, соответствующий сумме его свойств; u – управление конструированием (сборкой конструкции); x' – следующий (более высокий) уровень изделия, соответствующий применению управления u (добавлению детали в сборку); $F_k(x, u)$ – функционал на k -м этапе; $Q(x, u)$ – затраты k -го этапа (стоимость сборки на k -м этапе), соответствующие уровню x и управлению u ; $f_{k-1}(x')$ – затраты по изменению уровня на $k-1$ этапе (стоимость добавления детали в сборку).

Приведем пример использования разработанной методики оптимального конструирования. В качестве примера была использована конструкция лифтовой лебедки серии КИАТ-ЛПП с диапазоном грузоподъемностей от 400 до 1000 кг. Данные лебедки выпускаются ПАО «НИПТИЭМ» с 2008 года. Применение методики было проведено совместно с Кругликовым О.В. и Чернышевым Ю.В. [76, 84, 125].

На рис. 6.18 приведен граф конструирования привода безредукторной лифтовой лебедки, задача проектирования которого может быть сформулирована следующим образом: необходимо разработать конструкцию и определить ее элементы для безредукторной лифтовой лебедки, предназначенной для преобразования вращательного движения в поступательное перемещение с помощью канатоведущего шкива (КВШ), при обеспечении: необходимых

радиальных нагрузок на канатоведущий шкив; самоторможения электродвигателя при стоянке; расположения лебедки на раме.

Решение может быть получено различными способами: с помощью разработки специальной станины (оболочки) или применения серийной станины электродвигателя, специальных подшипниковых щитов (фланцевых, на лапах), использования устройств фиксации вала (электромагнитных тормозов) разных исполнений, оснащения конструкции лебедки дополнительными подшипниковыми опорами и вспомогательными устройствами.

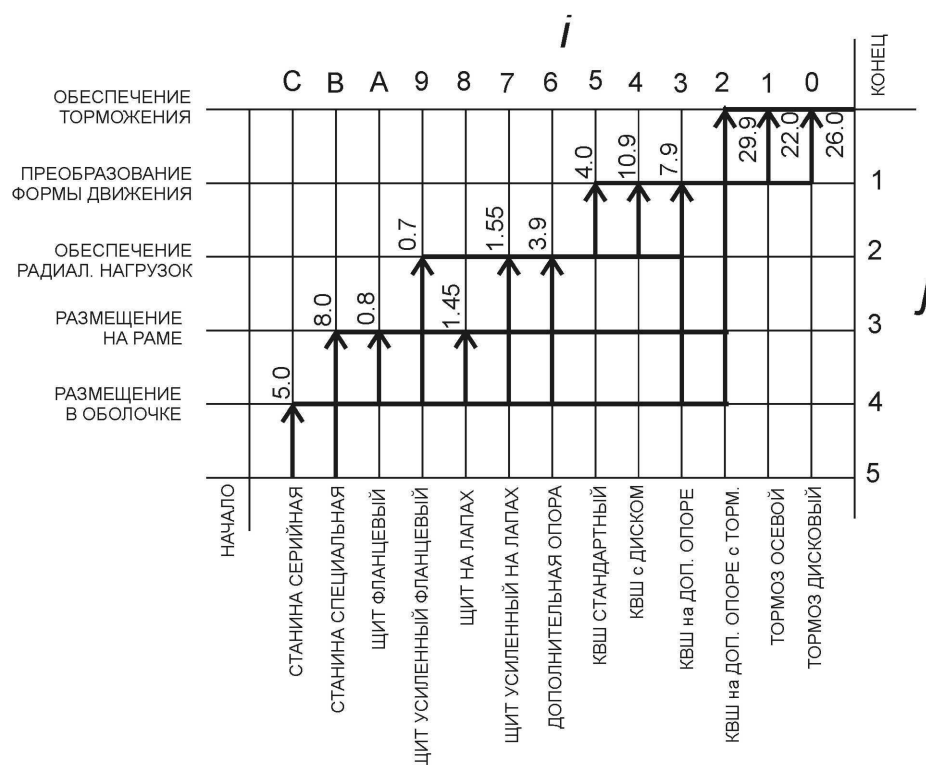


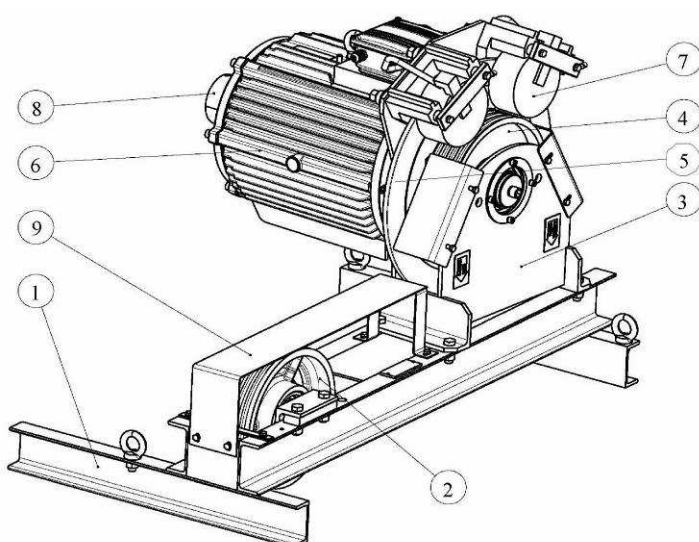
Рис. 6.18. Решетчатый граф ветвления задачи конструирования лебедки

В представленный на рис. 6.18 граф включены только те элементы конструкции, которые могут иметь вариативность. Началу соответствует активная часть электродвигателя (обмотанные сердечники ротора и статора), концу – соответствующая предъявляемым требованиям лифтовая лебедка, расположенная на раме, которую необходимо дооснастить датчиком частоты вращения, преобразователем частоты, защитным кожухом. Каждый вариант имеет свою стоимость, включающую затраты труда, материалов и электроэнергии, потраченных на изготовление элементов и оцененной в денежных

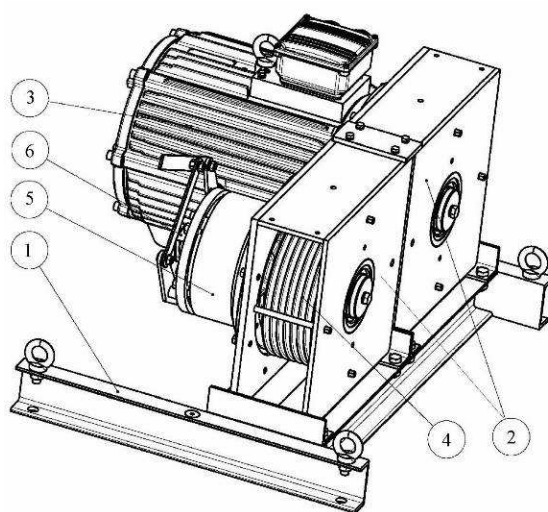
единицах – тысячах рублей. Значения стоимости получены в 2012 г. и соответствуют значениям, приведенным в таблице 6.3.

Поиск решения задачи проводится на основании уравнения (6.6). Стоимость элементов конструкции определяется в соответствии с (6.5).

В нашем случае управление – решение относительно выбора типа конструктивного элемента, например типа станины (специальная, серийная) – может принимать только дискретные значения. Допустимые управления проиллюстрированы стрелками на графе (см. рис. 6.18). Начало сборки показано в левом нижнем углу, окончание в правом верхнем. Решение задачи начинается с окончания графа, то есть из собранной конструкции.



- а)
 1 – рама;
 2 – отводной блок;
 3 – опора привода;
 4 – КВШ с 5 - диском;
 6 – электродвигатель;
 7 – дисковый тормоз;
 8 – датчик частоты вращения

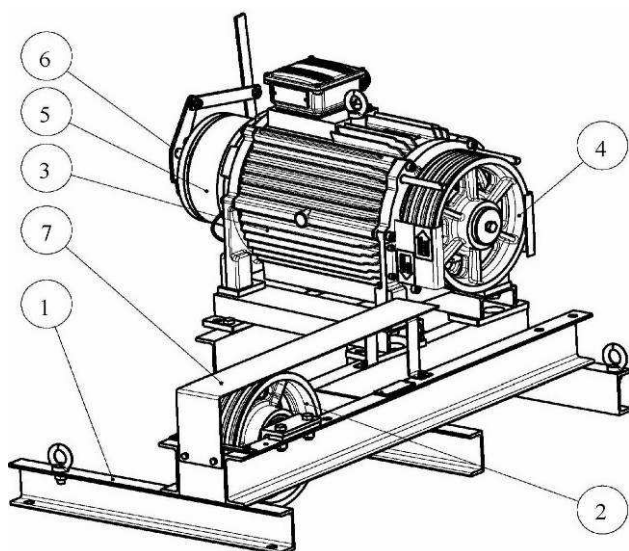


- б)
 1 – рама;
 2 – опоры привода;
 3 – электродвигатель;
 4 – второй КВШ;
 5 – осевой тормоз;
 6 – датчик частоты вращения

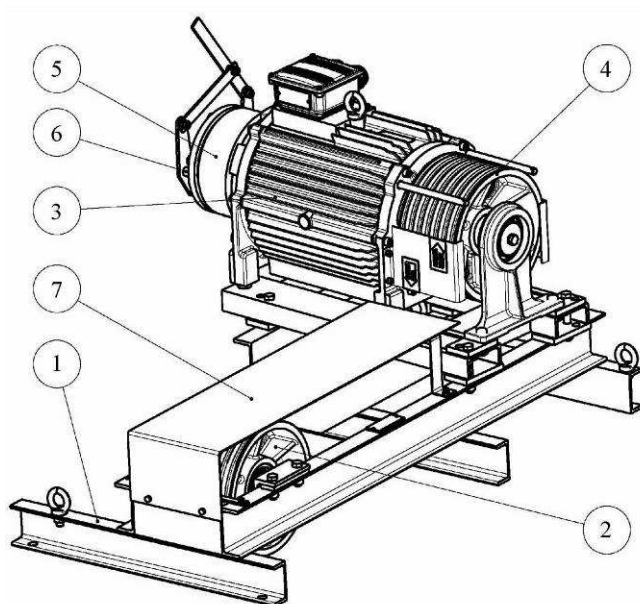
Рис. 6.19. Основные варианты конструкции привода лифтовой лебедки:

а) вариант конструкции с дисковым тормозом и дисковым КВШ;

б) вариант конструкции с двумя КВШ



- а)
 1 – рама;
 2 – отводной блок;
 3 – электродвигатель;
 4 – КВШ;
 5 – осевой тормоз;
 6 – датчик частоты вращения;
 7 – кожух;



- б)
 1 – рама;
 2 – отводной блок;
 3 – электродвигатель;
 4 – КВШ на дополнительной опоре;
 5 – осевой тормоз;
 6 – датчик частоты вращения;
 7 – кожух;

Рис. 6.20. Основные варианты конструкции привода лифтовой лебедки:

- а) вариант конструкции с осевым тормозом;
 б) вариант конструкции с осевым тормозом и дополнительной опорой

Для того чтобы определить себестоимость согласно (6.5) для уравнений (6.6), а также для проверки реализуемости и соответствия техническим требованиям предлагаемого варианта конструкции лебедки, необходимо проводить эскизное проектирование, геометрическое моделирование, расчеты, а в ряде случаев технологическую проработку. Для этого при решении данной задачи использовались пакеты: *Pro/ENGINEER*, *Windchill*, а также потенциал конструкторских и технологических подразделений ПАО «НИПТИЭМ». Основные варианты приводов лифтовой лебедки, разработанные в ходе данного проекта,

показаны на рис. 6.19, рис. 6.20. Стоимость вариативных (п.1-13) и общих (п.14-16) элементов конструкции лебедки приведена в таблице 6.3.

Таблица 6.3. Стоимость основных конструкционных узлов лифтовой лебедки

№ п/п	Элемент	Себест., тыс. руб.	учет вспом. элементов		итог себест., тыс. руб
			изм. себест.	элемент	
1	станина серийная	5,00			5,00
2	станина специальная	8,00			8,00
3	щит фланцевый передний	0,80			0,80
4	щит фланц. передний усиленный	0,70			0,70
5	щит на лапах	1,20	0,25	щит задний	1,45
6	щит на лапах усиленный	1,30	0,25	щит задний	1,55
7	дополнительная опора	2,70	1,30 -0,10	рама вал	3,90
8	КВШ стандартный	4,00			4,00
9	КВШ с диском	9,00	1,90 -0,30 0,30	рама лапы крепление	10,90
10	КВШ на дополнительной опоре	7,90			7,90
11	КВШ на дополн. опоре с тормозом	29,90			29,90
12	тормоз осевой	22,00			22,00
13	тормоз дисковый	26,50	-0,50	рама	26,00
14	Вал	1,70			6,60
15	задний щит	1,10			
16	рама	3,80			

Применение ряда вариативных элементов отражается на себестоимости общих деталей конструкции (удлинение вала, появление / изъятие лап и прочее). Это учитывается в стоимости варьируемой детали. Фактически таблица 6.3 представляет входные данные, которые могут быть получены как с помощью точной проработки элементов конструкции, так и более упрощенными способами, с последующим уточнением.

Граф ветвления задачи, разработанный для конструирования безредукторной лифтовой лебедки, показан на рис. 6.18. Увеличение качества изделия соответствует изменению счетчика j , а выбор элемента определяется счетчиком i . Таким образом, можно представить сборку лифтовой лебедки в виде последовательного уменьшения значения счетчиков i и j . Для удобства отображения счетчиков применена шестнадцатиричная система исчисления. На графе показаны значения себестоимости элементов лифтовой лебедки. В таблице 6.4 приведено решение задачи. Поля таблицы имеют следующее назначение: k – но-

мер шага решения; x' соответствует $x'(i,j)$ – текущая координата положения на графе (нахождения в узле графа); x соответствует $x(i,j)$ – координата положения на графе до принятия управления $u(i,j)$, обозначенного u ; $Q(x,u)$ – цена управления (стоимость элемента конструкции) на шаге k при нахождении в координате x ; $fk(x')$ себестоимость изделия на шаге $k-1$ при нахождении в координате x' ; $Fk+1(x,u)$ соответствует $Fk(x,u)$ формулы (6.6); $fk+1(x)$ соответствует $fk(x)$ формулы (6.6); uk – оптимальное управление (выбор) на k -м шаге.

Таблица 6.4. Таблица решения задачи конструирования

k	x	u	x'	$Q(x,u)$	$fk(x')$	$Fk+1(x,u)$	$fk+1(x)$	uk
0	x01	[1 0]	x00	26,00			26,00	[1 0]
	x11	[1 0]	x00	22,00			22,00	
	x2(4-3)	[4,3 0]	x00	29,90			29,90	
1	x34	[3 3]	x01	7,90	26,00	33,90	29,90	[1 4]
		[3 2]	x11		22,00	29,90		
	x42	[1 4]	x01	10,90	26,00	36,90	32,90	
		[1 3]	x11		22,00	32,90		
	x52	[1 5]	x01	4,00	26,00	30,00	26,00	
		[1 4]	x11		22,00	26,00		
	x84	[1 6]	x2(4-3)	1,45	29,90	31,35	31,35	
xA4	[1 8]	0,80			30,70	30,70		
xB5	[2 9]	8,00			37,90	37,90		
xC5	[1 10]	5,00			34,90	34,90		
2	xC5	[1 10]	x34	5,00	29,90	34,90	34,90	[2 4]
		[1 4]	x84		31,35	36,30		
		[1 2]	xA4		30,70	35,70		
	x64	[2 2]	x42	3,90	32,90	36,80	29,90	
		[2 1]	x52		26,00	29,90		
	x74	[2 3]	x42	1,55	32,90	34,45	27,55	
			x52		26,00	27,55		
x94	[2 5]	x42	0,70	32,90	33,60	26,70		
	[2 4]	x52		26,00	26,70			
3	xC5	[1 6]	x64	5,00	29,90	34,90	31,70	[1 3]
		[1 5]	x74		27,55	32,50		
		[1 3]	x94		26,70	31,70		

Управление на каждом шаге описывается двумерным вектором $[u_j \ u_i]$, координата u_j которого показывает величину перемещения по вертикали, что соответствует приобретению нового свойства изделием, за счет принятия той или иной детали конструкции, координата u_i – показывает величину горизонтального перемещения к следующей сборочной операции, на которой изделием будет приобретено новое свойство. Размерность вектора u ограничена размерностью графа. Решение начинается из собранного состояния $x(0,0)$, ко-

торое соответствует собранной конструкции. С этим связана принятая обратная нумерация. Шестнадцатеричный формат записи выбран исходя из соображения удобства представления решения в тексте.

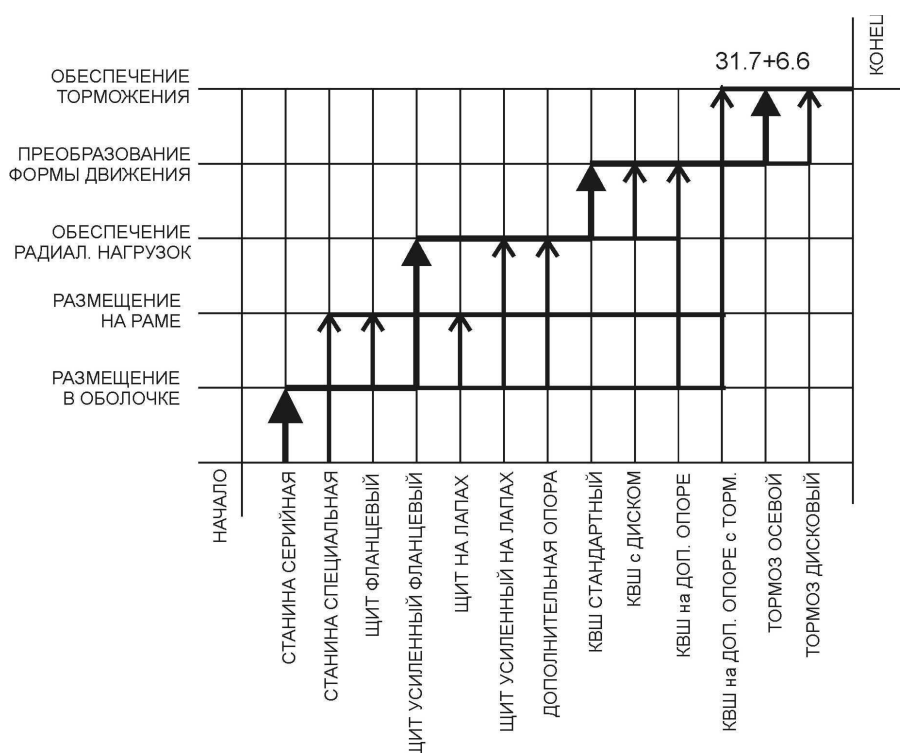


Рис. 6.21. Оптимальный путь конструирования

Как видно из таблицы решения задачи оптимизации, оптимальный путь конструирования лебедки состоит из четырех шагов [1 3], [2 4], [1 4], [1 0] (см. рис. 6.21), при этом стоимость составит 38,3 тыс. руб с вариативной составляющей 31,7 тыс.руб. Кратчайший путь конструирования лебедки состоит из двух шагов [1 10], [4 0], при этом стоимость составит 41,5 тыс. руб с вариативной составляющей 34,9 тыс.руб. (В ценах 2012 г.)

Полученное решение (рис. 6.21 путь: [1 3], [2 4], [1 4], [1 0]) соответствует оптимальной конструкции лифтовой лебедки при заданных значениях стоимости основных элементов оболочки. Для адекватного реагирования на изменение цен компонентов конструкции требуется периодически или ситуационно изменять входные данные, приведенные в таблице 6.3, и повторять решение. При этом критическое изменение цены на отдельный компонент может привести к изменению конструкции изделия в целом.

Анализ опытной эксплуатации предлагаемой методики оптимального конструирования показал, что наибольшую сложность представляет разработка графа ветвления для задачи конструирования. Это обусловлено необходимостью эскизной конструкторской проработки изделия, которая определяет входные данные методики. Кроме того, при построении графа возникают дополнительные ветви, которые также необходимо прорабатывать с точки зрения конструкции и технологии.

Выводы по главе 6

1. Использование серийных элементов конструкции электродвигателей при изготовлении машин переменного тока для мехатронных систем требует взвешенного подхода. Для этого необходимо проведение дополнительного анализа энергетических и экономических показателей электрической машины.

2. Предложенная методика уточненного расчета мощности магнитных потерь позволяет учесть добавочные потери в конструктивных элементах, обусловленные эффектом вытеснения магнитного потока из шихтованного ярма статора в сплошную оболочку. Указанный эффект проявляется при высокой степени насыщения ярма статора, соответствующей амплитуде индукции 1,55Тл. Величина «аномальной» добавочной составляющей потерь мощности может стать ограничением при использовании серийных станин и связанных с ними конструктивных решений, используемых материалов.

3. Разработанная новая методика оптимального конструирования электродвигателя мехатронной системы по стоимостному критерию, основанная на методе дискретного программирования, актуальна при разработке сложных конструкций электрических машин. С ее помощью конструктор может определить оптимальный состав серийных и специальных деталей, формирующих минимальную стоимость машины, но при этом обеспечивающих необходимые, заложенные в техническом задании, требования. Кроме того, использование методики позволяет адекватно реагировать на изменение цен конструктивных компонентов и узлов мехатронной системы.

ГЛАВА 7. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЕКТНЫХ ВАРИАНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Одной из наиболее сложных и трудоемких задач, решаемых в процессе разработки электродвигателей, является поисковый расчет, цель которого заключается в отыскании главных размеров электрической машины, параметров пазо-зубцовой геометрии и обмоточных данных.

Алгоритм энергетического расчета и проектирования был приведен в главе 2, модели для исследования и методы расчетов в главах 3 и 4 соответственно, вспомогательные инструменты оптимизации в главе 5. Также в главе 5 были приведены примеры проведения энергетических расчетов при разработке мехатронных систем. Однако вопрос определения базового двигателя, с выбора которого начинается проектирование, остался за рамками рассмотрения. Следует отметить, что в пределах указанной главы под базовым двигателем (аналогом) понимается общепромышленный электродвигатель в закрытом или защищенном исполнении, из которого будет получаться его модификация, специализированная под использование в мехатронной системе. Такой подход связан с использованием тактики последовательных модификаций и особенностями производства электрических машин.

Следующим важным моментом является вопрос оценки технико-экономических характеристик проектных вариантов электрических машин. Как показывает практика, обеспечить выполнение технических требований можно с помощью различных конструкций активной части электродвигателя – проектных вариантов, которые характеризуются разными конструктивными параметрами: главными размерами, пазово-зубцовыми геометриями, обмоточными данными. Однако для того, чтобы выбрать перспективную для производства конструкцию активной части двигателя из нескольких имеющихся, необходимо поставить в соответствие каждому проектному варианту некоторый параметр, интегрально учитывающий его технико-экономические характеристики.

7.1 Критерии технико-экономического анализа

На протяжении всей истории развития электромеханики и электромашиностроения конструкторы электрических машин делали попытки разработать универсальный критерий, необходимый для определения главных размеров электродвигателя, а также принципы подобия для отыскания примерных параметров пазово-зубцовой геометрии и обмоточных данных. В качестве универсального критерия для определения главных размеров электрических машин ведущими учеными – электромеханиками были предложены машинные постоянные Э. Арнольда, И.М. Постникова, Р. Рихтера, К.И. Шенфера.

Использование машинных постоянных позволяет связать между собой объем активной части двигателя и величину электромагнитных нагрузок на нее: индукцию в воздушном зазоре и линейную электрическую нагрузку. Такой подход не учитывает изменение теплоотдачи при переработках конструкции машины, типа охлаждения и других модификациях. Экспертная оценка проектного варианта электродвигателя с помощью машинной постоянной возможна только в рамках машин одного назначения, что затрудняет оценку электрических модификаций двигателя, имеющих разную величину магнитной индукции в зазоре. Использование машинных постоянных для разработки двигателей, имеющих различные типы охлаждения, различные номинальные частоты вращения, широкий диапазон мощностей, затруднено [40, 45, 181, 186]. Это объясняется тем, что номинальные величины машинных постоянных, характерные для конкретных технических приложений, до настоящего времени не установлены, а рекомендуемый диапазон, например, машинной постоянной Э. Арнольда, широк.

С использованием машинных постоянных были разработаны общепромышленные асинхронные двигатели середины и конца 20 века: А, АО, АО2, 4А. Однако начиная с 80-х годов 20 века при разработке серий стали применять оптимальное проектирование, на основе которого были разработаны серии: АИ, 5А, РА, АДМ, 7АВЕ. В результате применение машинных постоянных свелось к их использованию в задачах сравнительной оценки и анализа, а также при

предварительном определении главных размеров. В настоящее время стало возможным решение задач определения главных размеров, сравнительной оценки и анализа удельной энергонасыщенности машины без использования машинных постоянных. Теперь это можно осуществить, применяя данные обобщающей информационной базы, которая включает в себя значения основных электромеханических показателей, главных размеров, весовых и габаритных параметров, а также основных соотношений, характеризующих пазово-зубцовую геометрию. Указанная база данных основных параметров машин была получена на основе систематизации и обобщения данных испытаний общепромышленных электродвигателей актуальных серий и соответствующих этим машинам обмоточных записок, содержащих параметры активных частей. Наличие такой базы данных у проектировщика позволит отказаться от использования машинных постоянных как при определении главных размеров, так и при анализе удельных показателей активной части и исключить нестабильность оценок, связанную с разбросом значений машинных постоянных. Кроме того, создание специализированного инструмента, включающего данные о пазово-зубцовой геометрии листов ротора и статора, а также специальных правил выбора листов с соответствующими параметрами, дополняющих базу данных основных параметров электродвигателей, позволит проводить рациональный подбор пазово-зубцовых параметров, уже имеющихся на производстве сердечников, которые могут модифицироваться при дальнейшей оптимизации. Это, в свою очередь, позволит сократить время определения базового варианта двигателя для анализа и модификации его характеристик, что особенно важно, когда речь идет о скорейшем изготовлении макетного образца.

База данных основных параметров общепромышленных электрических машин может быть получена с помощью специальной активной таблицы, например *Excel*, в которую вносятся соответствующие параметры из обмоточных записок и протоколов испытаний. В таблице 7.1 приведены пассивные поля (данные) и активные поля (формулы), необходимые для построения базы данных.

Таблица 7.1. Поля базы данных энергетических характеристик

№ п/п	Параметр	Формула	ед. изм	№
1	Номинальная мощность	P_2	кВт	
2	Число полюсов	$2p$		
3	Номинальная частота	f_1	Гц	
4	Скольжение в ном. режиме	s_H		
5	Коэффициент мощности	$\cos\varphi$		
6	Длина пакета	L_1	мм	
7	Внешний диаметр статора	$Da1$	мм	
8	Внутренний диаметр статора	$Di1$	мм	
9	Число зубцов статора	z_1		
10	Число зубцов ротора	z_2		
11	Высота паза статора	h_1	мм	
12	Шаг обмотки статора	y_1		
13	Конструктивная длина активной части	$L = L_1 + 20 + 2 \cdot \left(0,19 + 0,1 \frac{2p}{2} \right) \times$ $\times \pi (Di1 + h_1) \frac{y_1}{z_1}$	мм	7.1
14	Масса электродвигателя	m_Σ	кг	
15	Объем активной части	$V = \frac{\pi Da1^2 L}{4 \cdot 10^9}$	м ³	7.2
16	Кратность макс. момента	K_M		
17	Кратность мин. момента	$K_{\text{МИН}}$		
18	Кратность пуск. момента	$K_{\text{П}}$		
19	Кратность пуск. тока	K_I		
20	Потери механические	$p_{\text{МЕХ}}$	Вт	
21	Потери магнитные	p_{FE}	Вт	
22	Потери в обмотке статора	p_{CU1P}	Вт	
23	Потери в обмотке статора, приведенные к раб. температуре	$p_{\text{CU1}} = p_{\text{CU1P}} \frac{(1 + 0,004\Theta_{\text{CU1}})}{(1 + 0,004(t_R + 20))}$	Вт	7.3
24	Потери в обмотке ротора	p_{CU2}	Вт	
25	Потери добавочные	$p_{\text{Д}}$	Вт	
26	Рабочая температура	t_R	°C	
27	Перегрев обмотки статора	Θ_{CU1}	°C	
28	КПД	$\eta = \frac{P_2 \cdot 1000 \cdot 100}{p_{\text{CU1P}} + p_{\text{CU2}} + p_{\text{FE}} + p_{\text{МЕХ}} + p_{\text{Д}}}$	%	7.4
28	КПД, приведенный к рабочей температуре	$\eta = \frac{P_2 \cdot 1000 \cdot 100}{p_{\text{CU1}} + p_{\text{CU2}} + p_{\text{FE}} + p_{\text{МЕХ}} + p_{\text{Д}}}$	%	7.5
30	Греющие потери	$p_{\text{ГР}} = p_{\text{CU1}} + 0,7 p_{\text{CU2}} + 0,6 p_{\text{FE}}$	Вт	4.4
31	Коэффициент потерь	$K_0 = \frac{p_{\text{FE}}}{p_{\text{CU1}} + p_{\text{CU1}} + p_{\text{FE}}}$		4.12
32	Коэффициент греющих потерь	$K_{01} = \frac{K_{\text{FE}} p_{\text{FE}}}{p_{\text{CU1}} + 0,7 p_{\text{CU2}} + 0,6 p_{\text{FE}}}$	Вт	4.12

Продолжение таблицы 7.1.

№ п/п	Параметр	Формула	ед. изм	№
33	Постоянная времени нагрева	$T = \frac{250 m_{\Sigma} \Theta_{CU1}}{60 \cdot (p_{CU1} + p_{CU2} + p_{FE})}$	мин	7.6
34	Эквивалентное тепловое сопротивление для греющих потерь	$R_{\Theta 1} = \frac{\Theta_{CU1}}{p_{ГР}}$	°C/Вт	7.7
35	Кратность длительного момента при частоте, отличной от номинальной	$K_{МДf} = \frac{M}{M_H} = \sqrt{\frac{p_{ГР} - 0,6 p_{FE} \left(\frac{f}{f_1} \right)^{1,3}}{p_{CU1} + 0,7 p_{CU2}}}$		7.8
36	Оптимальная частота питания	$f_{ОПТ} = f_1 \cdot \sqrt[1,3]{\frac{1}{2,3 K_{01}}}$	Гц	7.9
37	Нормированное значение перегрева обмотки статора	Θ_{CU1H}	°C	
38	Макс. величина греющих потерь	$p_{ГРМАКС} = p_{ГР} \frac{\Theta_{CU1H}}{\Theta_{CU1}}$	Вт	7.10
39	Макс. значение длительного момента	$M_{ДМ} = \frac{9550 \cdot P_2 \cdot 2 p \left(1 - \frac{s_H}{100} \right)}{60 \cdot f_1 \cdot 2} \sqrt{\frac{p_{ГРМАКС}}{p_{ГР}}}$	Нм	7.11
40	Коэффициент изменения вентиляции при IC410	β_0		
41	Макс. величина греющих потерь при IC410	$p_{ГРIC410} = \frac{p_{ГРМАКС} (\beta_0 - K_{01})}{0,75 + 0,25 \beta_0 - K_{01}}$	Вт	7.12
42	Кратность длительного момента при IC410	$K_{МДИС410} = \frac{M_{IC410}}{M_H} = \sqrt{\frac{p_{ГРIC410}}{p_{ГРМАКС}}}$		7.13
43	Предельная температура, соответствующая классу изоляции	$t_{КИЗ}$	°C	
44	Температура охлаждающей жидкости	$t_{ОЖ}$	°C	
45	Макс. величина греющих потерь при жидкостном охлаждении	$p_{ГРОЖ} = p_{ГР} \frac{(t_{КИЗ} - t_{ОЖ})}{0,5 \cdot \Theta_{CU1} + 10}$	Вт	7.14
46	Кратность длительного момента при жидкостном охлаждении	$K_{МОЖ} = \frac{M_{IC71W}}{M_H} = \sqrt{\frac{p_{ГРОЖ}}{p_{ГРМАКС}}}$		7.15
47	Удельный момент при IC410	$M_{УIC410} = K_{MIC410} \frac{M_{ДМ}}{V}$	Нм/м³	7.16
48	Удельный момент при IC411, IC416	$M_{УIC416} = \frac{M_{ДМ}}{V}$	Нм/м³	7.17
49	Удельный момент при жидкостном охлаждении	$M_{УОЖ} = K_{МОЖ} \frac{M_{ДМ}}{V}$	Нм/м³	7.18

Необходимо пояснить основные формулы, приведенные в таблице 7.1. Формула (7.1) получается добавлением к длине сердечника длины вылета лобовых частей в соответствии с [58]. Выражение (7.3) необходимо для приведения потерь в обмотке статора к фактической температуре обмотки, так как данный вид потерь приводится в протоколах к рабочей температуре 75°C или 115°C. Формулы (7.4), (7.5) устанавливают значения КПД, приведенного к рабочей и фактической температуре обмотки статора.

Выражение (7.6) оценивает величину тепловой постоянной времени. Это выражение получается из известных предпосылок [90, 186, 196, 231]:

$$T = \frac{1}{60} m_{\Sigma} c_{\Sigma} R_{\Theta} = \frac{m_{\Sigma} c_{\Sigma} \Theta_{CU1}}{60 \cdot (p_{CU1} + p_{CU2} + p_{FE})},$$

где c_{Σ} – средняя удельная теплоемкость двигателя, приведенная к обмотке статора, полученная величина $c_{\Sigma}=250$ Дж/кг·град подобрана на основе расчетно-экспериментальных данных. Следует отметить, что найденная величина значительно меньше теплоемкостей любого из элементов машины, и указанное уменьшение обуславливается учетом адиабатического нагрева обмотки электродвигателя, влияние которой как бы ускоряет процесс нагрева. Формула (7.8), показывающая изменение величины длительного снимаемого с машины момента на разных частотах f , получается, как решение уравнения:

$$p_{ГР} - \left(\frac{M}{M_H} \right)^2 (p_{CU1} + K_{CU2} p_{CU2}) - K_{FE} p_{FE} \left(\frac{f}{f_1} \right)^{1.3} = 0, \quad (7.19)$$

которое характеризует условие равенства греющих потерь, а следовательно, и превышений температуры обмотки статора на номинальной частоте f_1 и частоте f при штатном охлаждении машины. Выражение (7.9) является экстремумом (максимумом) функции кратности длительной мощности от частоты:

$$\frac{\partial K_p}{\partial f} = \frac{\partial}{\partial f} \left[f \sqrt{\frac{p_{ГР} - K_{FE} p_{FE} \left(\frac{f}{f_1} \right)^{1.3}}{p_{CU1} + K_{CU2} p_{CU2}}} \right],$$

которая, в свою очередь, получается из (7.19) и характеризует оптимальную

частоту питания электродвигателя, то есть частоту, при которой с машины можно снять наибольшую длительную мощность, при том же значении превышения температуры обмотки статора, что и в номинальном режиме.

Выражения (7.10), (7.11) показывают мощность максимальных греющих потерь для данной машины и максимального допустимого значения превышения температуры обмотки статора, а также величину момента, соответствующего этим потерям, и следовательно, перегреву. Выражения (7.12), (7.13) позволяют оценить уровень греющих потерь и кратность снижения мощности длительного режима при изменении способа охлаждения с принудительной вентиляции *IC411* на естественное охлаждение *IC410*.

Формулы (7.14), (7.15) показывают значения мощности максимальных греющих потерь и кратности увеличения длительного момента для данной машины при изменении типа охлаждения на водяное охлаждение поверхности сердечника статора, с температурой охлаждающей жидкости $t_{\text{ож}}$. Выражение (7.14) получается на основе упрощенной тепловой схемы замещения 3.15, при замене перепада температуры на сопротивлении R_3 постоянным перепадом температуры, равным 10°C , значение которого соответствует среднестатистическому значению перепада температуры на участке оболочка двигателя – охлаждающая жидкость, рекомендуемого в [22, 155] и подтвержденного опытом ПАО «НИПТИЭМ» при испытаниях электродвигателей с жидкостным охлаждением (*IC71W*). Выражения (7.16), (7.17), (7.18) характеризуют удельные (объемные) значения момента электродвигателя в длительном режиме при методах охлаждения машин *IC411*, *IC416*, *IC71W* по ГОСТ Р МЭК 60034-6-2012.

В приложении 1 приведена таблица, иллюстрирующая таблицу 7.1 для двигателей серии 5A (АИР).

Методика использования разработанной базы данных основных параметров двигателей заключается в следующем. Анализ данных по длительному моменту и оптимальной частоте питания позволяет определить габарит, полюсность и тип охлаждения электрической машины, необходимые для использования в мехатронной системе на основе сопоставления численных

значений, приведенных в ячейках таблицы. В случае, если в технических требованиях габарит задан, то разработчик на основании данных таблицы может, во-первых, по удельным показателям близкого габарита определить необходимый тип охлаждения, во-вторых, определить предварительную длину сердечника машины на основании выражений (7.16), (7.17), (7.18) с последующим уточнением с помощью выражения (4.6). Кроме того, добавляя данные разработанного электродвигателя в приведенную таблицу, можно провести сравнение его удельных показателей с удельными показателями, достигнутыми ранее, в том числе на общепромышленных машинах.

База данных, систематизирующая диаметры листов и основные размеры пазово-зубцовых зон сердечников статора и ротора, может быть получена на основе таблицы, созданной в редакторе электронных таблиц, например, с помощью *Excel*, в которую вносятся соответствующие параметры из обмоточных записок или чертежей листов ротора и статора. В таблице 7.2 приведены пассивные поля (данные) и активные поля (формулы), необходимые для создания обозначенного инструмента систематизации данных.

Таблица 7.2. Поля базы данных штампов

№ п/п	Параметр	Формула	ед. изм	№
1	Число полюсов (статор)	$2p$		
2	Внешний диаметр статора	$Da1$	мм	
3	Внутренний диаметр статора	$Di1$	мм	
4	Число зубцов статора	z_1		
5	Ширина клиновой части паза статора	b_{k1}	мм	
6	Ширина дна паза статора	b_{g1}	мм	
7	Высота паза статора	h_{z1}	мм	
8	Высота шлица паза статора	h_{c1}	мм	
9	Ширина шлица паза статора	b_{c1}	мм	
10	Угол наклона шлица	α_s	град	
11	Полюсное деление статора	$\tau = \frac{\pi Di1}{2p}$	мм	7.20
12	Зубцовое деление статора	$t_{z1} = \frac{\pi Di1}{z_1}$		7.21
13	Высота клиновой части паза статора	$h_{k1} = \begin{cases} 0,5(b_{k1} - b_{c1}) \operatorname{tg}(2\pi\alpha_s / 360), & \alpha_s > 0 \\ 0,5\sqrt{(b_{k1}^2 - b_{c1}^2)}, & \alpha_s = 0 \end{cases}$	мм	7.22

Продолжение таблицы 7.2.

№ п/п	Параметр	Формула	ед. изм	№
14	Ширина верха зубца статора	$b_{z11} = t_{z1} \left(1 + 2 \frac{h_{c1} + h_{k1}}{Di1} \right) - b_{k1}$	мм	7.23
15	Ширина корня зубца статора	$b_{z12} = t_{z1} \left(1 + 2 \frac{h_{z1} - 1}{Di1} \right) - b_{g1}$	мм	7.24
16	Средняя ширина зубца статора	$b_{z1} = \frac{b_{z11} + b_{z12}}{2}$	мм	7.25
17	Протяженность зубцов статора в полюсном делении	$\tau_{b2} = \frac{b_{z1} z_1}{2p}$	мм	7.26
18	Суммарная ширина зубцов ста- тора	$b_{z1\Sigma} = 2p\tau_b$	мм	7.27
19	Односторонняя ширина воз- душного зазора	δ	мм	
20	Внешний диаметр ротора	$Da2$	мм	
21	Число зубцов ротора	z_2	мм	
22	Высота верхней клетки паза ро- тора*	h_{z2}	мм	
23	Ширина верхней клетки паза ротора*	b_{k2}	мм	
24	Ширина шлица верхней клетки паза ротора*	b_{c2}	мм	
25	Высота шлица верхней клетки паза ротора*	h_{c2}	мм	
26	Высота мостика паза ротора	h_{m2}	мм	
27	Высота нижней клетки паза ро- тора (или простой клетки)	h_{z3}	мм	
28	Ширина клиновой части ниж- ней двойной (или простой клет- ки паза ротора)	b_{k3}	мм	
29	Ширина дна нижней двойной (или простой клетки паза ротора)	b_{g3}	мм	
30	Ширина шлица нижней клетки паза ротора (или простой клетки)	b_{c3}	мм	
31	Высота шлица нижней клетки паза ротора (или простой клетки)	h_{c3}	мм	
32	Угол наклона шлица паза рото- ра	α_R	град	
33	Зубцовое деление ротора	$t_{z2} = \frac{\pi Da2}{z_2}$	мм	7.28
34	Высота клиновой части паза ро- тора (нижней или простой клет- ки)	$h_{k3} = \begin{cases} 0,5(b_{k3} - b_{c3}) \operatorname{tg}(2\pi\alpha_R / 360), & \alpha_R > 0 \\ 0,5\sqrt{(b_{k3}^2 - b_{c3}^2)}, & \alpha_R = 0 \end{cases}$	мм	7.29
35	Ширина верха зубца ротора	$b_{z21} = t_{z2} \left(1 - 2 \frac{h_{z2} + h_{c3} + h_{k3}}{Da2} \right) - b_{k3}$	мм	7.30

Окончание таблицы 7.2.

№ п/п	Параметр	Формула	ед. изм	№
36	Ширина корня зубца ротора	$b_{z22} = t_{z2} \left(1 - 2 \frac{h_{z2} + h_{z3}}{Da2} \right) - b_{g3}$	мм	7.31
37	Средняя ширина зубца ротора	$b_{z2} = \frac{b_{z21} + b_{z22}}{2}$	мм	7.32
38	Протяженность зубцов ротора в полюсном делении	$\tau_{b2} = \frac{b_{z2} z_2}{2p}$	мм	7.33
38	Суммарная ширина зубцов ротора	$b_{z2\Sigma} = 2p\tau_{b2}$	мм	7.34
40	Условие проверки соответствия диаметров ротора и статора	$Di2 = Da1 - 2\delta$		7.35
41	Условие проверки соответствия протяженности зубцов в полюсных делениях ротора и статора	$\tau_{b2} = (0,9...1,1)\tau_{b1}$		7.36
42	Условие проверки соответствия суммарной ширина зубцов ротора	$b_{z2\Sigma} = (0,9...1,1)b_{z2\Sigma}$		7.37

Примечание: * - параметр не задается при простой клетке ротора (овальном пазе).

Поясним основные формулы, приведенные в таблице 7.2. Выражения (7.20) - (7.25) и (7.28) - (7.32) – это классические выражения расчета параметров геометрии штампа статора и ротора соответственно из ОСТ16-0.801.302-85 «Машины электрические вращающиеся от 40 до 355 габарита включительно. Двигатели асинхронные. Методика электромагнитных расчетов» [158]. Выражения (7.26) и (7.27) позволяют вычислить протяженность зубцов в полюсном делении статора и суммарную ширину зубцов статора. Формулы (7.33) и (7.34) позволяют вычислить протяженность зубцов в полюсном делении ротора и суммарную ширину зубцов ротора. Проверка возможности использования имеющихся листов статора и ротора в проектируемой машине осуществляется на основании проверки соответствия внешнего диаметра листа ротора внутреннему диаметру листа статора (7.35). В случае, если указанная проверка пройдена, проверяется соответствие суммарной ширины зубцов ротора суммарной ширине зубцов статора (7.37) и соответствие протяженности зубцов в полюсных делениях ротора и статора (7.36). Выполнение указанных проверок свидетельствует о соизмеримых индукциях в зубцах

статора и ротора, что дает возможность рассмотреть дальнейшее проектирование машины с выбранными листами. На практике разработчик для выбранного статора находит ротор с допустимым внешним диаметром и соответствующей суммарной шириной зубцов.

7.2 Исследование перегрузочной способности двигателя

Задача обеспечения необходимой перегрузочной способности в диапазоне регулирования – важный аспект разработки силовых компонентов мехатронной системы. Перегрузочная способность зависит как от параметров электрической машины, так и от действующего значения напряжения питания электродвигателя, которое, в свою очередь, зависит от напряжения в звене постоянного тока и алгоритма управления коммутацией ключей инвертора. Необходимо обеспечивать заданную перегрузочную способность как в первой, так и во второй зоне механической характеристики. На первых этапах энергетических расчетов и при проектировании машины можно выделить некоторые характерные (диктующие) точки механической характеристики – соответствующие минимальной частоте вращения, номинальной частоте вращения, максимальной частоте вращения при постоянной мощности двигателя, и т. д.

Опыт проектирования регулируемых двигателей показал, что наиболее сложными, с точки зрения обеспечения необходимой перегрузочной способности, являются: точка минимальной частоты вращения, которая соответствует началу зоны постоянства момента механической характеристики, и точка максимальной частоты вращения, которая соответствует концу зоны постоянства мощности механической характеристики. Для обеспечения заданной перегрузочной характеристики на этапе разработки электрической машины необходимо проводить цикл расчетов и корректировать геометрию активной части так, чтобы обеспечить перегрузочную способность двигателя в каждой характерной (диктующей) точке.

Ниже приведена методика экспертной оценки параметров схемы замещения асинхронных электродвигателей, необходимых для обеспечения требуемой перегрузочной способности в характерных (диктующих) точках механической характеристики электропривода по параметрам на номинальной частоте, с учетом подводимого напряжения на других частотах диапазона регулирования.

Перегрузочная способность асинхронного двигателя на минимальной частоте вращения в наибольшей степени зависит от активного сопротивления статора. В связи с этим, регулируемые машины, работающие при низких частотах питания, стараются выполнить с наименьшим из возможных значений активного сопротивления статора – «медными» [6, 59, 133]. (См. параграф 5.6).

Оценить влияние активного сопротивления статора можно, используя формулу максимально момента асинхронного электродвигателя:

$$M_{\text{м}} = \frac{mpU_1^2}{2\pi f_1 \left(\sqrt{R_1^2 + X_{\text{к}}^2} + R_1 \right)}, \quad (7.38)$$

где $X_{\text{к}}$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания, а также приближенную формулу потока машины:

$$\Phi \cong \frac{U_1}{\pi \sqrt{2} w_1 k_{\text{об}} f_1} = \frac{U_1}{f_1} k, \quad (7.39)$$

где w_1 – число витков обмотки; $k_{\text{об}}$ – обмоточный коэффициент; $k = \left(\pi \sqrt{2} w_1 k_{\text{об}} \right)^{-1}$ – коэффициент пропорциональности.

Если привести выражение (7.38) к виду:

$$M_{\text{м}} = \frac{mp}{4\pi} \frac{U_1^2}{f_1^2} \frac{1}{\frac{1}{f} \left(\sqrt{R_1^2 + X_{\text{к}}^2} + R_1 \right)} = \frac{mp}{4\pi} \left[\frac{U_1}{f_1} \right]^2 \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{R_1^2}{f_1^2} + \frac{X_{\text{к}}^2}{f_1^2}} + \frac{R_1}{f_1} \right)}, \quad (7.40)$$

и учесть выражение (7.39), то можно получить формулу:

$$M_{\text{м}} = \frac{mp}{4\pi k} \Phi^2 \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{R_1^2}{f_1^2} + \frac{X_{\text{к}}^2}{f_1^2}} + \frac{R_1}{f_1} \right)},$$

анализ которой приводит к очевидному выводу, что при уменьшении частоты питания и обеспечении постоянства потока индуктивное сопротивление короткого замыкания изменяется пропорционально уменьшению частоты, а активное сопротивление не изменяется – этим обусловлено снижение максимального момента при пропорциональном снижении частоты и амплитуды напряжения питания.

На рис. 7.1 показаны перегрузочные характеристики асинхронных двигателей, полученные для одного типоразмера различных серий, иллюстрирующие влияние активного сопротивления, кратность максимального момента.

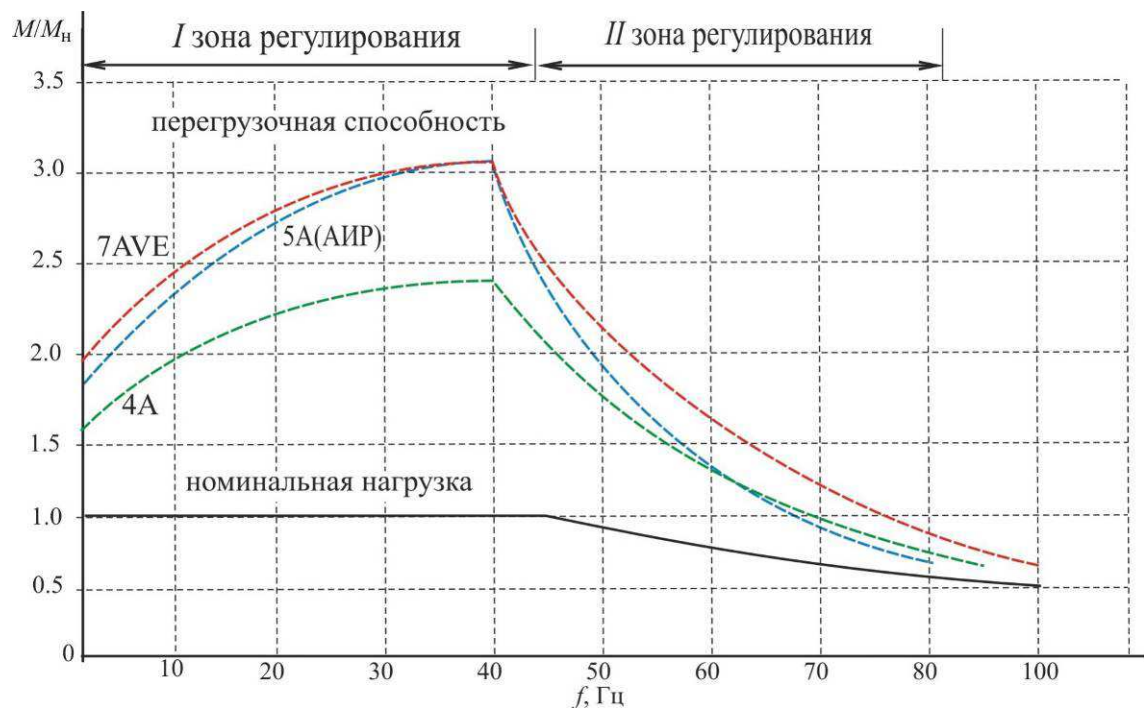


Рис. 7.1. Соотношение перегрузочных характеристик электродвигателя 180S4, 22кВт серий 4А, 5А(АИР), 7АВЕ.

$R_1(4A)=0,22 \text{ Ом}; L_K(4A)=0,0043 \text{ Гн}; R_1(5A)=0,19 \text{ Ом}; L_K(5A)=0,0034 \text{ Гн};$
 $R_1(7AVER)=0,12 \text{ Ом}; L_K(7AVER)=0,0034 \text{ Гн}$

Повышение амплитуды напряжения относительно его пропорциональной зависимости от частоты, называемое «бустом» и применяемое для стабилизации кратности максимального момента, можно представить как увеличение магнитного потока выше номинального в зоне низких частот, которое

возможно только в небольших пределах $\frac{\Phi_{\text{МАКС}}}{\Phi_{\text{Н}}} = 1...1,12$, при ориентировочном значении номинальной индукции в зубцах $B_{Z1}=1,7 - 1,9 \text{ Тл}$ (где значение

1,9 Тл соответствует максимальному потоку). Учитывая данный факт, преобразуем выражение (7.40) к виду:

$$M_M = \frac{mp}{4\pi} \left[\frac{U_1}{f_1} (1...1,12) \right]^2 \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{R_1^2}{f_1^2} + \frac{X_K^2}{f_1^2}} + \frac{R_1}{f_1} \right)}. \quad (7.41)$$

Заменяя величину индуктивного сопротивления короткого замыкания $X_K = 2\pi f_1 L_K$ на соответствующую ей индуктивность, получим равенство, связывающее параметры схемы замещения с максимальным моментом и параметрами питания:

$$\sqrt{\frac{R_1^2}{f_1^2} + (2\pi L_K)^2} + \frac{R_1}{f_1} = \frac{mp}{4\pi} \left[\frac{U_1}{f_1} (1...1,12) \right]^2 \frac{1}{M_M},$$

которое после замены $\sqrt{\frac{R_1^2}{f_1^2} + (2\pi L_K)^2} + \frac{R_1}{f_1} = A$ можно преобразовать к виду:

$$A \left(A - 2 \frac{R_1}{f_1} \right) = (2\pi L_K)^2. \quad (7.42)$$

На основании полученного равенства (7.42) нетрудно вывести формулу для определения максимальной величины активного сопротивления статора, необходимой для обеспечения перегрузочной способности электродвигателя:

$$R_1 \leq \frac{1}{2} f_1 \left(A - \frac{(2\pi L_K)^2}{A} \right),$$

которая после подстановки A принимает окончательный вид:

$$R_1 \leq \frac{1}{2} f_1 \left(\frac{mp}{4\pi} \left[\frac{U_1}{f_1} (1...1,12) \right]^2 \frac{1}{M_M} - \frac{(2\pi L_K)^2}{\frac{mp}{4\pi} \left[\frac{U_1}{f_1} (1...1,12) \right]^2 \frac{1}{M_M}} \right). \quad (7.43)$$

Известно, что при высоких частотах питания на перегрузочную способность в наибольшей степени влияет величина индуктивности короткого замыкания. Оценить максимальную величину индуктивности короткого замыкания, при которой возможно обеспечить требования по перегрузочной

способности на высоких частотах питания, можно, используя выражение (7.42), которое при пренебрежении малой величиной $\frac{2R_1}{f_1} \rightarrow 0$, при $f_1 > 50$ Гц, принимает вид:

$$(2\pi L_K)^2 = A^2,$$

а после подстановки A , преобразуется к окончательному неравенству:

$$L_K \leq \frac{mp}{8\pi^2} \left[\frac{U_1}{f_1} \right]^2 \frac{1}{M_M}. \quad (7.44)$$

Выборочная проверка применения полученных ограничений, накладываемых на максимальные значения активного сопротивления и индуктивности, проведенная для ранее разработанных двигателей с ВОВ 160 – 250мм и полюсностями $2p=2,4,6$, показала, что ошибка расчета составляет от 4% до 14 % при определении активного сопротивления, для младших и старших высот соответственно, и не превосходит 5% вычисления индуктивности короткого замыкания.

Разработанная методика расчета максимальных значений активного сопротивления и индуктивности короткого замыкания позволяет установить связь между перегрузочной механической характеристикой частотно-регулируемого асинхронного двигателя и параметрами его схемы замещения. Наиболее целесообразно применять указанный подход при оценке параметров схемы замещения электродвигателей, управляемых с помощью скалярных типов управления, например, рольганговых двигателей и тяговых машин рельсового электротранспорта.

7.3 Экономическая оценка и методика выбора вариантов двигателя мехатронной системы

Экономическая оценка проектного варианта электродвигателя мехатронной системы должна, с одной стороны, содержать расчет себестоимости его активной части, с другой стороны, отражать стоимость преобразователя

электрической энергии, т. е. инвертора, а также должна включать в себя стоимость конструктивных элементов системы и цену механической передачи.

Необходимо отметить, что вычисление себестоимости в естественных денежных единицах нецелесообразно из-за инфляции, а также нестабильности цен на основные материалы и компоненты мехатронной системы, вызванной действиями спекулянтов на сырьевых биржах. Замечено, что приведение себестоимости к одному из материалов – меди, для оценки себестоимости электрических машин может существенно снизить влияние нестабильности цен на используемые материалы и учесть влияние инфляции. Однако при этом необходимо привести цены на остальные материалы и компоненты к цене на медь.

Универсальной оценкой является себестоимость материалов активной части электродвигателя с помощью формулы [45]:

$$C_{AC} = k_{CCU1} m_{CU1} + k_{CAL2} m_{AL2} + k_{CFE} m_{FEZ}, \quad (7.45)$$

где k_{CCU1} , k_{CAL2} , k_{CFE} – коэффициенты приведения удельной стоимости обмоточной меди, литого алюминия (или роторной меди в случае применения обмотки ротора с медной сварной клеткой), электротехнической стали соответственно, приведенные к цене 1 кг меди; m_{CU1} , m_{AL2} , m_{FEZ} – масса обмоточного провода, клетки ротора и заготовительной стали соответственно. Стоимость материалов оболочки и конструктивных элементов электрической машины может быть упрощенно оценена на основе выражения:

$$C_{FR} = k_{CFR} m_{FR}, \quad (7.46)$$

где k_{CFR} – коэффициент приведения удельной стоимости материала оболочки к стоимости 1 кг меди; m_{FR} – масса оболочки и конструктивных деталей электрической машины.

Используя аналогичный подход, необходимо стоимость силового преобразователя электрической энергии привести к цене 1 кг меди таким образом, чтобы его стоимость, выраженная в цене меди, была пропорциональна величине длительного тока. Такая оценка для мехатронных систем, получающих питание от низковольтных сетей, может быть представлена в виде выражения:

$$C_{PC} = k_{CU\_I} I_{1T} + k_{CU\_C}, \quad (7.47)$$

где k_{CU_I} – коэффициент, приводящий стоимость одного ампера длительного тока трехфазного инвертора к цене 1 кг меди; I_{1T} – необходимая величина тока статора с учетом дискретности выпускаемых преобразователей; k_{CU_C} – составляющая стоимости управления силового преобразователя, приведенная к цен 1кг меди. В таблице 7.3. представлена нормализованная дискретность тока [51] инверторов на напряжение сети 400В для стандартного ряда мощностей электродвигателей, выпускаемых различными производителями [183, 184, 185, 190, 207, 277].

Таблица 7.3. Параметры низковольтных трехфазных преобразователей частоты

P_2 , кВт	2,2	3	4	5,5	7,5	11	15
I_1 , А	5,3	7,2	9,4	12,9	17,5	25,5	34,6
P_2 , кВт	18,5	22	30	37	45	55	75
I_1 , А	42,4	50,1	67,0	80,4	95,9	114,8	150,0
P_2 , кВт	90	110	132	160	200	250	
I_1 , А	176,1	210,4	250,6	299,1	271,0	460,0	

Аналогичным способом необходимо привести стоимость остальных конструктивных элементов мехатронной системы и цену механической передачи к цене одного килограмма меди. В таблице 7.4 даны коэффициенты приведения к цене одного килограмма меди цен на заготовительную сталь, алюминий, элементы оболочки и конструктивные элементы двигателя, компоненты преобразователя частоты, актуальные для 2013г.

Сумма цен на все основные компоненты C_{AC} , C_{FR} , C_{PC} будет характеризовать стоимость материалов и основных компонентов мехатронной системы.

Следует отметить, что при таком подходе в качестве оптимального по стоимостному критерию варианта технического решения мехатронной системы будет выбран тот, который будет обладать минимальной стоимостью материалов и компонентов. К сожалению, при разработке и рассмотрении проектных вариантов мехатронной системы приведение значений их техни-

ческих характеристик к одинаковым значениям невозможно. Поэтому оптимизация на основании выбора решения с минимальной себестоимостью не корректна. Следовательно, основным недостатком предложенного метода анализа экономической целесообразности проектного варианта решения мехатронной системы является не эквивалентное сравнение между собой двух и более неидентичных, с точки зрения технических характеристик, вариантов.

Таблица 7.4. Коэффициенты приведения себестоимости

№ п/п	Название	Обозначение	Величина
1	Коэффициент приведения стоимости обмоточного провода к цене 1кг меди	k_{CCU1}	1,3
2	Коэффициент приведения стоимости алюминия к цене 1кг меди	k_{CAL2}	0,42
3	Коэффициент приведения стоимости заготовительного железа к цене 1кг меди	k_{CFE}	0,12
4	Коэффициент приведения стоимости оболочки и конструктивных элементов к цене 1кг меди	k_{CFR}	0,5
5	Коэффициент приведения стоимости – коэффициент, преобразующий стоимость 1А длительного тока к цене одного килограмма меди	k_{CU_I}	4,2
6	составляющая стоимости управления силового преобразователя, приведенная к цене меди	k_{CU_C}	37,5

Для разрешения указанного противоречия некоторыми авторами [110] предлагается преобразование стоимости материалов и основных компонентов, а также технических характеристик к новому функционалу, суммирующему значения себестоимостей и значений технических характеристик, помноженных на соответствующие коэффициенты значимости, назначаемые экспертами или лицами, принимающими решения. Использование такого подхода неоднозначно и необоснованно.

Для исключения указанной неоднозначности можно использовать следующую методику. Так как принципиально невозможно привести значения технических характеристик к одинаковым величинам, а можно только ограничить их снизу и сверху в соответствии с данными технических требований, кроме того, нецелесообразно исключать из процесса сравнения вариантов эксперта – лицо, принимающее решение (проектировщика), то следует выра-

зить изменение технических характеристик в величинах, показывающих рост их стоимости. Таким образом, лицо, принимающее решение, сможет оперировать не только величиной себестоимости проектного варианта, но и величинами ее чувствительности к изменению технических требований, показывающих величину увеличения стоимости системы, которая потребуется для изменения одной из технических характеристик. Это, в свою очередь, позволит выбирать вариант технического решения, обеспечивающий не только минимальную стоимость изделия, но и минимальное ее увеличение, на которое необходимо будет пойти для повышения или снижения значения одной или нескольких технических характеристик.

Рассмотрим предлагаемую методику более подробно.

Предположим, что разработано k вариантов технических решений электромеханического преобразователя энергии для мехатронной системы. Каждый из этих вариантов характеризуется:

1. Главными размерами ($Da_1, Di_1, L_1, 2p, \delta$).
2. Параметрами пазово-зубцовой геометрии ($z_1, z_2, h_{z1}, h_{z2}, b_{z1}, b_{z2}, \dots$).
3. Обмоточными данными ($a_1, y_1, S_n, d_{из}, n_{\Sigma}, Q_k, \dots$).

Получая питание от силового преобразователя, управляемого в соответствии с разработанными алгоритмами управления, электродвигатель обеспечивает:

1. Энергетические характеристики (КПД, $\cos\phi$, p_{CU1} , p_{CU2} , p_{FE}) при значении превышения температуры обмотки статора Θ_{CU1} .
2. Электромеханические характеристики (I_1, M, n, K_M) в диапазоне регулирования $n_{мин}$, $n_{ном}$, $n_{макс}$, эквивалентном частотам вращения $f_{мин}$, f_n , $f_{макс}$ при ограничении момента $M(f_{мин})$, $M(f_n)$, $M(f_{макс})$, обусловленного тепловой нагрузкой, и ограничении кратности максимального момента $K_M(f_{мин})$, $K_M(f_n)$, $K_M(f_{макс})$, регламентированных напряжением и алгоритмами управления силового преобразователя.

При этом стоимость материалов и основных компонентов разработанного варианта мехатронной системы равна величине C .

Тогда, изменяя величину длины пакета L_1 и корректируя обмоточные данные $a, y_1, Sn, d_{из}, n_{\Sigma}$, можно разработать близкий вариант с измененными энергетическими и электромеханическими характеристиками.

Вычисляя разности идентичных характеристик в базовом и новом варианте, получаем набор значений Δ_i , например, $\Delta K_{ПД}, \Delta \cos \varphi, \Delta p_{CU1}, \Delta p_{CU2}, \Delta p_{FE}, \Delta \Theta_{CU1}, \Delta I_1, \Delta K_M, \Delta M(f_{мин}), \Delta M(f_{макс}), \Delta K_M(f_{мин}), \Delta K_M(f_{макс})$ и разность, характеризующую величину изменения себестоимости ΔC . Находя отношения $\frac{\Delta C}{\Delta_i}$, получаем величину, указывающую стоимость изменения i -ой энергетической или электромеханической характеристики. Как показала практика, наиболее важными из перечисленных приращений являются: $\Delta K_{ПД}, \Delta \Theta_{CU1}, \Delta I_1, \Delta K_M$. Таким образом, варианты решений могут быть представлены в виде таблицы:

Таблица 7.5. Таблица для нахождения решения

№	Геометрия и парам ак- тивной части	Технические характери- стики	С, у.е.	$\frac{\Delta C}{\Delta K_{ПД}},$ у.е.	$\frac{\Delta C}{\Delta \Theta_{CU1}},$ у.е.	$\frac{\Delta C}{\Delta I_1},$ у.е.	$\frac{\Delta C}{\Delta K_M},$ у.е.
Вар 1							
Вар 2							
...							
Вар n							

На основе анализа данных, приведенных в таблице 7.5., проектировщик или иное лицо, принимающее решение, может совершить адекватный выбор. Для этого он должен либо привести два или более варианта к одинаковым значениям технической характеристики, рассчитав необходимые значения Δ_i , и, умножив эти значения на соответствующее $\frac{\Delta C}{\Delta_i}$, выбрать вариант, обла-

дающий минимальным значением величины $\left(C + \frac{\Delta C}{\Delta_i} \right) C$, либо, исходя из ба-

зовых знаний о проектируемой мехатронной системе, выбрать вариант, имеющий минимальное значение $\frac{\Delta C}{\Delta_i}$, при допустимой себестоимости C .

Использование разработанной методики оценки вариантов показывает хорошие результаты при возможности варьирования несколькими, дискретно заданными внешними диаметрами статора, числами пар полюсов, параметрами пазов ротора. Однако при ее использовании необходимо представлять, какая техническая характеристика наиболее значима для изделия. Например, если важна надежность машины, то необходимо минимизировать не только величину $\Delta\Theta_{CU1}$, но и величину $\frac{\Delta C}{\Delta\Theta_{CU1}}$, так как если в процессе жизненного

цикла выяснится, что мехатронная система обладает невысокой надежностью из-за перегрева электродвигателя, то модифицирование машины с минимальным значением $\frac{\Delta C}{\Delta\Theta_{CU1}}$ вызовет минимальные затраты на ее улучшение.

Если необходимо разработать высокودинамичную систему, то необходимо выбирать вариант с максимальным значением K_M и минимальным значением $\frac{\Delta C}{\Delta K_M}$, по той же причине минимальных затрат на вынужденную или плано-

вую модификацию. Следует отметить, что минимизация $\frac{\Delta C}{\Delta K_{ПД}}$ соответству-

ет системам с планомерно повышаемым классом энергоэффективности. Ми-

нимизация величины $\frac{\Delta C}{\Delta I_1}$ соответствует мехатронным системам, обеспечи-

вающим минимальные затраты на запланированное увеличение мощности.

Выводы по главе 7

1. Использование машинных постоянных Арнольда, Постникова, Рихтера, Шенфера, являющихся своего рода отражением достигнутого уровня тепловой и электромагнитной нагрузки электрических машин, при современ-

ном развитии электромеханики, в части разнообразия конструкций электрических машин, а также информационных технологий, в части накопления и обобщения опыта, не актуально. Эти постоянные могут быть заменены на информационную базу данных, которая обобщает конструктивные и технические показатели современных электрических машин. Таким образом, практически любая машина, необходимая для проектирования на ее основе мехатронной системы, может быть получена на основе модификации аналога, входящего в информационную базу данных.

2. Формирование информационной базы данных технических характеристик аналогов происходит на основании обобщения расчетов и экспериментов, проводимых при разработке общепромышленных и специальных электродвигателей.

3. Предлагаемые методы заполнения полей информационных баз данных технических характеристик аналогов включают возможность оценки тепловых, электромеханических, регулировочных, экономических характеристик современных электродвигателей. Позволяют оценивать перспективы использования вновь разработанного или имеющегося электродвигателя с заданной геометрией активной части с точки зрения его применения в мехатронных системах. Дают рекомендательные значения параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя, при которых будет обеспечена его надежная работа в диапазоне двухзонной механической характеристики.

4. Предложенный подход к экономической оценке электромеханического и силового преобразователей мехатронной системы учитывает неустранимый, дискретный характер изменения технических характеристик и выражает совокупность технико-экономических показателей системы в условных единицах – стоимости килограмма меди.

ГЛАВА 8. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТРАНСПОРТА

В данной главе рассмотрено практическое использование и внедрение положений работы, которые включают в себя разработку программных продуктов и силовых компонентов мехатронных систем. В приложении приведены акты и справки о внедрении практических результатов работы, нашедших применение на предприятиях российского электротехнического концерна ООО «Русэлпром», в который входят: ПАО «Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения» (НИПТИЭМ) г. Владимир, ООО «Владимирский электромоторный завод» (ПК «ВЭМЗ») г. Владимир, ООО «Русэлпром-Мехатроника» (ранее ООО «ВЭМЗ-Спектр») г. Москва, ООО «Сафоновский электромашиностроительный завод» (Русэлпром-СЭЗ) г. Сафоново, Смоленская область, ООО НПО «Ленинградский электромашиностроительный завод» (НПО «ЛЭЗ») г. Санкт-Петербург и другие предприятия. Применение энергетического расчета предприятиями концерна рекомендовано научно-техническим советом ООО «Русэлпром» от 16.07.2014, а также научно-техническим советом ПАО «НИПТИЭМ» от 29.10.2015.

8.1 Разработка программного обеспечения автоматизированного проектирования и моделирования электрических двигателей для мехатронных систем

Программа **"AED_TA 2.1"** предназначена для проведения компьютерного моделирования частотно-регулируемого асинхронного электропривода и мехатронных систем в динамических режимах работы с учетом особенностей двигателя, нагрузки и алгоритмов управления.

Результаты моделирования являются основой для проверки соответствия выбранного асинхронного электропривода, в том числе частотно-

регулируемого, с заданной механической нагрузкой и требованиям к показателям качества регулирования. Программа в разное время устанавливалась в расчетных подразделениях инженерных центров электромашиностроительных заводов концерна «Русэлпром»: ООО «ВЭМЗ-Спектр», ООО «Русэлпром-электропривод», ПАО «НИПТИЭМ», ООО «Русэлпром-СЭЗ».

Возможности модели электродвигателя. Программа позволяет моделировать асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором при соединении обмотки в звезду или треугольник. В программе возможно моделирование системы с двумя типами представления уравнений асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором: на основе линейных и нелинейных параметров схемы замещения. Используемая в программе модель позволяет качественно учитывать неравномерность воздушного зазора, несимметрию параметров фазных обмоток, температуру обмоток статора и ротора.

Возможности моделирования силовой части преобразователя – инвертора. Моделирование производится укрупнено, т. е. эффекты преобразования рода тока учитываются без влияния квантования ШИМ. Это объясняется тем, что для точного моделирования широтно-импульсной модуляции необходимы затраты времени, в 1000...2000 раз большие в сравнении с затратами укрупненного моделирования инвертора, в то же время результаты, рассчитанные с помощью точного моделирования ШИМ, уступают в читаемости и точности реализуемому методу.

В модели инвертора учтены нелинейности выходного напряжения при различных типах коммутации (идеальная синусоидальная, пространственно-векторная, шеститактная), а также ограничения величины выходного напряжения, вызванные ограничением минимальной скважности и падением напряжения на полупроводниковых приборах инвертора.

Возможности модели управления частотой вращения. Из существующего множества типов и структур управления асинхронными электродвигателями для реализации в программе были выбраны следующие: вольт-частотное скалярное управление; скалярное управление с регулятором потока; косвенное векторное

управление *IRFO*, прямое векторное управление *DRFO*, прямое цифровое управление моментом *DTC*. Векторные типы управления присутствуют в двух вариантах: с регулятором магнитного потока и без него. *DTC* управление выполнено в двух вариантах: с обратной связью по частоте вращения и без нее.

Возможности модели механической нагрузки. Программа позволяет воспроизводить основные типы механической нагрузки, которые можно представить в виде одностепенной модели с линейными и нелинейными зависимостями момента от частоты вращения или времени.

Возможности модели верхнего уровня системы автоматического управления. В реальной системе электропривода нагрузка и задание по частоте вращения чаще всего имеют сложный характер, обусловленный действием регуляторов верхнего уровня. Для синтеза таких воздействий в программу введена подсистема упрощенного моделирования системы автоматического управления (САУ), которая представляет собой замкнутую систему с одним входом, одним выходом и двумя возмущающими воздействиями.

Входные параметры элементов системы, которые задаются пользователем в программе, сведены в таблицу 8.1.

Таблица 8.1. Входные параметры элементов системы с АЭД

Элемент системы	Входные параметры системы
Двигатель	Параметры Т-образной схемы замещения: $L_{1\sigma}$ – индуктивность рассеяния фазы статора; $L_{2\sigma}(I_2, f_2)$ – индуктивность рассеяния ротора в функции тока и частоты тока ротора; $L_m(I_m)$ – индуктивность контура намагничивания в функции тока намагничивания. Момент инерции ротора J . Число полюсов p . Коэффициент трения ротора K_F . А- массив амплитуд пространственных гармоник индуктивности контура намагничивания, введенный для отражения эффектов «уплощения» и «заострения» индукции в расточке.
Дополнит. Параметры и начальные условия	Температура обмотки статора Θ_1 ; температура обмотки ротора Θ_2 . Амплитуда обратных колебаний индуктивности контура намагничивания ΔL_m . Начальное значение частоты вращения Ω_0 , начальное значение электромагнитного момента M , начальное значение токов фаз двигателя I_0 .

Продолжение таблицы 8.1

Элемент системы	Входные параметры системы	
Сеть	Обязательные параметры	Действующее значение фазного напряжения U_1 . Частота сети f_1 . Углы сдвига фаз φ_1 .
	Необязательные параметры	Интервал изменения амплитуды или частоты напряжения сети. Время реверсирования вращения t_p .
Инвертор	Тип коммутации, напряжение звена постоянного тока U_{DC} . Коэффициент использования напряжения инвертора $k_{и}$. Величина падения напряжения на ключе инвертора в открытом состоянии U_{VT} .	
Вольт-частотное скалярное управление	Без ОС по частоте вращения	Вольт-частотная характеристика $U_1(f_1)$. Заданная частота вращения в функции времени $\Omega_3(t)$.
	С ОС по частоте вращения	Вольт-частотная характеристика $U_1(f_1)$. Параметры регулятора частоты вращения: пропорциональная составляющая k_{PC} ; интегральная составляющая T_{PC} ; ограничение регулятора скорости $s_{МАКС}$ (максимальная частота скольжения). Заданная частота вращения в функции времени $\Omega_3(t)$.
Скалярное управление с регулятором магнитного потока ротора	Без ОС по частоте вращения	Параметры регулятора магнитного потока: пропорциональная составляющая k_{PP} , интегральная составляющая T_{PP} . Заданная величина потока $\Psi_3(\Omega)$ в функции частоты вращения. Заданная частота вращения в функции времени $\Omega_3(t)$.
	С ОС по частоте вращения	Параметры регулятора магнитного потока: пропорциональная составляющая k_{PP} , интегральная составляющая T_{PP} . Заданная величина потока $\Psi_3(\Omega)$ в функции частоты вращения. Параметры регулятора частоты вращения: пропорциональная составляющая k_{PC} ; интегральная составляющая T_{PC} ; ограничение регулятора скорости $s_{МАКС}$ (максимальная частота скольжения). Заданная частота вращения в функции времени $\Omega_3(t)$.

Продолжение таблицы 8.1

Элемент системы	Входные параметры системы	
Векторное <i>IRFO</i> , <i>DRFO</i> управление	Без ОС по потоку	Параметры модели двигателя: L_1 – индуктивность статора; L_2 – индуктивность ротора; L_m – индуктивность контура намагничивания; R_1 – сопротивление статора; R_2 – сопротивление ротора. Параметры регулятора I_{dq}: пропорциональная составляющая k_{BP}; интегральная составляющая T_{BP}. Заданная величина тока I_d в функции частоты вращения. Параметры регулятора частоты вращения: пропорциональная составляющая k_{PC}; интегральная составляющая T_{PC}; ограничение регулятора скорости $I_{\text{МАКС}}$ (максимальный приведенный ток ротора). Заданная частота вращения в функции времени $\Omega_3(t)$.
	С ОС по потоку	Параметры модели двигателя: L_1 – индуктивность статора; L_2 – индуктивность ротора; L_m – индуктивность контура намагничивания; R_1 – сопротивление статора; R_2 – сопротивление статора. Параметры регулятора I_{dq}: пропорциональная составляющая k_{BP}; интегральная составляющая T_{BP}. Заданная величина потока в функции частоты вращения Ψ_d. Параметры регулятора частоты вращения: пропорциональная составляющая k_{PC}; интегральная составляющая T_{PC}; ограничение регулятора скорости $I_{\text{МАКС}}$ (максимальный приведенный ток ротора). Параметры регулятора потока: пропорциональная составляющая k_{PP}, интегральная составляющая T_{PP}, время нарастания потока T_{HP}. Заданная частота вращения в функции времени $\Omega_3(t)$.

Продолжение таблицы 8.1

Элемент системы	Входные параметры системы	
DTC управление	Без ОС по частоте вращения	Заданная величина потока в функции частоты вращения Ψ_d . Заданный электромагнитный момент в функции времени $T_3(t)$.
	С ОС по частоте вращения	Заданная величина потока в функции частоты вращения Ψ_d . Параметры регулятора частоты вращения: пропорциональная составляющая k_{PC} ; интегральная составляющая T_{PC} ; ограничение регулятора скорости $I_{\text{МАКС}}$ (максимальный момент электродвигателя). Заданная частота вращения в функции времени $\Omega_3(t)$.
Нагрузка	Тип нагрузки; величина момента нагрузки в функции времени или частоты вращения $M_C(t)$, $M_C(\Omega)$; значение момента инерции приводного механизма J_M	
Подсистема моделиров. САУ	Общие	Управляющая координата в функции времени $X^*(t)$; нагрузка электродвигателя в функции времени $M_C(t)$; возмущающая координата $Y(t)$; коэффициент связи между частотой вращения и моментом нагрузки k_1 ; коэффициент связи между выходной координатой и возмущающей координатой k_2 .
	Релейный двухпозиционный регулятор САУ	Величина ограничения регулятора $\Omega_{\text{МАКС}}$ (максимальная частота вращения); величина гистерезиса регулятора δ_p
	Релейный трехпозиционный регулятор САУ	Величина насыщения регулятора $\Omega_{\text{МАКС}}$; величина гистерезиса регулятора δ_p ; величина зоны нечувствительности $\delta_{\text{НР}}$.
	ПИД регулятор САУ	Величина пропорциональной составляющей регулятора $k_{\text{ПР}}$; величина интегральной составляющей регулятора $k_{\text{ИР}}$; величина дифференциальной составляющей регулятора $k_{\text{ДР}}$; величина ограничения регулятора $\Omega_{\text{МАКС}}$

Окончание таблицы 8.1

Элемент системы	Входные параметры системы	
Подсистема моделиров. САУ	Нерегулируемый электропривод	Действующее значение фазного напряжения U_1 . Частота сети f_1 .
	Электропривод со скалярным управлением	Вольт-частотная характеристика $U_1(f_1)$.
	Электропривод с векторным управлением	Напряжение звена постоянного тока U_{DC} . Ограничение действующего фазного значения тока $I_{\text{МАКС}}$. Заданная величина потока в функции частоты вращения $\Psi_3(\Omega)$. Параметры регулятора частоты вращения: пропорциональная составляющая k_{PC} ; интегральная составляющая T_{PC} .

Выходными характеристиками программы являются следующие:

1. Динамические:

1.1. Электромеханические характеристики: фазные токи $I_1(t)$, $I_2(t)$; электромагнитный момент $M(t)$ в соотношении с моментом нагрузки $M_C(t)$; механическая частота вращения $\Omega(t)$.

1.2 Электромагнитные характеристики: потокосцепления фаз $\Psi_1(t)$; $\Psi_2(t)$; модуль потокосцепления ротора $|\Psi_2|$.

1.3 Потери: электрические потери в фазах обмотки статора p_{CU1} ; электрические потери в фазах обмотки ротора p_{CU2} ; суммарные электрические потери $p_{\text{ЭЛ}}$.

1.4 Регулировочные характеристики (выводятся только для регулируемого электропривода): заданная и действующая частота вращения $\Omega_3(t)$, $\Omega(t)$; ошибка по частоте вращения $X_\Omega(t) = \Omega_3(t) - \Omega(t)$; продольная и поперечная составляющие токов статора $i_d(t)$, $i_q(t)$ соответственно; расчетное

значение электромагнитного момента для векторного управления

$$M_{ras}(t) = \frac{3p}{2} \frac{L_m}{L_R} \psi_d i_d.$$

2. Механические характеристики: динамическая механическая характеристика $M_d(\Omega)$, построенная по значениям $M(t)$ и $\Omega(t)$ в соотношении со статической механической характеристикой $M(\Omega)$.

3. Анализ результатов моделирования:

3.1 Результаты расчета динамических показателей привода при пуске: время пуска t_{Π} (время, необходимое системе для попадания в 3%...5% «коридор» установившегося значения частоты вращения $\Omega_{уст}$); время нарастания частоты вращения t_H ; перерегулирование частоты вращения σ ; максимальная частота вращения $\Omega_{макс}$; максимальный динамический момент $M_{макс}$, средние электрические потери в роторе и статоре при пуске $P_{CU1п}$, $P_{CU2п}$.

3.2 Результаты расчета установившихся параметров работы: установившееся значение тока $I_{уст}$; установившееся значение скольжения s_H ; значение потерь в обмотках ротора и статора в установившемся режиме $P_{CU1н}$, $P_{CU2н}$.

3.3 Результаты расчета динамических показателей при скачкообразном изменении нагрузки: время реакции t_p (время, необходимое системе для попадания в 3%...5% «коридор» установившейся частоты вращения $\Omega_{уст}$); минимальная частота вращения $\Omega_{мин}$.

3.4 Результаты расчета установившегося значения ошибки по частоте вращения $x_{\Omega y}$ и среднеквадратичной ошибки $\langle x_{\Omega} \rangle^2$.

4. Результаты упрощенного моделирования САУ:

4.1 Заданное значение частоты вращения электропривода в функции времени $\Omega_3(t)$.

4.2 Заданное значение момента нагрузки в функции времени $M_c(t)$.

4.3 Выходная координата в функции времени $X(t)$.

Программа обладает дружелюбным интерфейсом. Пользователю доступны только те кнопки, нажатие которых не приведет к неполному или некорректному выбору режима моделирования. Однако возможность задания пользователем некорректных численных параметров сохраняется. Основные экранные формы программы показаны на рис. 8.1 -8.3.

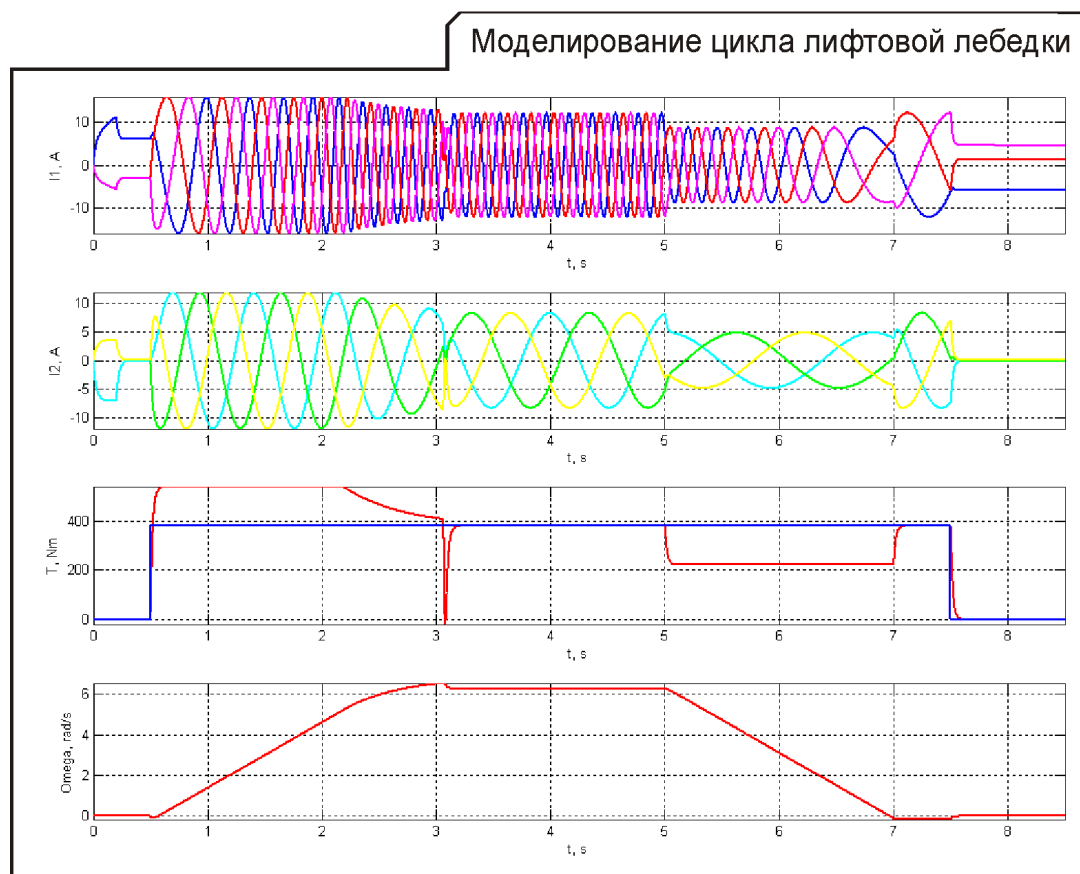


Рис. 8.3. Окно вывода электромеханических диаграмм программы *AED_TA 2.0*

Программа "*VIP_TA 1.0*" предназначена для выполнения имитационного моделирования и проведения поверочного электромагнитного расчета вентильно-индукторного электродвигателя, работающего в составе мехатронной системы с учетом типа нагрузки, конструктивных особенностей индукторной машины, алгоритмов управления током и частотой вращения.

Результаты моделирования являются основой для проверки соответствия выбранной индукторной машины и параметров системы управления с заданной механической нагрузкой и требованиям к показателям качества регу-

лирования. Программа установлена и используется в расчетно-теоретическом секторе ПАО «НИПТИЭМ» с 2005г.

Входные параметры элементов системы, которые задаются пользователем в программе, сведены в таблицу 8.2.

Таблица 8.2. Входные параметры элементов системы с ВИД

Элемент системы	Входные параметры системы
Двигатель	Зависимость потокосцепления фазы от угловой координаты и тока $\Psi(i_k, \gamma_k)$. Момент инерции ротора J . Число полюсов p . Коэффициент трения ротора K_F .
Дополнит. параметры и начальные условия	Температура обмотки статора Θ_1 . Начальное значение частоты вращения Ω_0 , начальное значение электромагнитного момента M_0 .
Инвертор	Тип коммутации, напряжение звена постоянного тока U_{DC} . Коэффициент использования напряжения инвертора $K_{и}$. Величина падения напряжения на ключе инвертора в открытом состоянии U_{VT} .
Управление	Зависимость фазного тока от угловой координаты $I_3(\gamma)$, угол включения γ_0 . Параметры регулятора тока: пропорциональная составляющая k_{BP} ; интегральная составляющая T_{BP} . Параметры регулятора частоты вращения: пропорциональная составляющая k_{PC} ; интегральная составляющая T_{PC} ; ограничение регулятора скорости $I_{МАКС}$ (максимальный ток фазы). Заданная частота вращения в функции времени $\Omega_3(t)$.
Нагрузка	Тип нагрузки; величина момента нагрузки в функции времени или частоты вращения $M_C(t)$, $M_C(\Omega)$; значение момента инерции приводного механизма J_M .

Возможности модели электрической машины. Программа позволяет моделировать m -фазные индукторные двигатели ($m \geq 2$). Моделирование инвертора осуществляется упрощенно без учета квантования ШИМ.

Для моделирования системы управления в программе используется способ задания алгоритма управления, при котором задается зависимость фазного тока от угла поворота ротора. При этом амплитуда тока задается регулятором частоты вращения, предусмотрен регулятор углов опережения токового

сигнала относительно электрической угловой координаты. Такой подход представления системы управления позволяет воспроизводить практически все известные способы управления вентильно-индукторными двигателями. Механическая нагрузка должна быть представлена на основе одномассовой модели с зависимостью момента от времени или частоты вращения.

Выходными характеристиками программы являются следующие:

1. Статические характеристики при заданной частоте вращения и ограничению по току:

1.1 Мгновенные электромеханические характеристики: значения тока в k -фазе $I_k(\gamma)$, при задании по току $I_3(\gamma)$; электромагнитный момент $M_k(\gamma)$ от тока k -ой фазы; суммарный электромагнитный момент $M(\gamma)$. Напряжение, прикладываемое к обмотке k -ой фазы $u_k(\gamma)$; потокосцепление k -ой фазы $\Psi_k(\gamma)$.

1.2 Мгновенные значения электромагнитных характеристик: индукция в зубце статора $B_{z1}(\gamma)$; индукция в зубце ротора $B_{z2}(\gamma)$; индукция в ярме статора и ротора $B_{j1}(\gamma), B_{j2}(\gamma)$ соответственно.

1.3 Средние для цикла преобразования электромеханические характеристики: максимальный ток фазы $I_{\text{МАКС}}$, средний момент M , максимальное значение момента $M_{\text{МАКС}}$, коэффициент неравномерности момента k_H , средние потери в обмотке статора p_{CU1} , в сердечнике статора p_{FE1} , сердечнике ротора p_{FE2} , суммарные потери p_{Σ} и значение КПД

2. Динамические:

2.1. Электромеханические характеристики: фазные токи $I(t)$; электромагнитный момент $M(t)$ в соотношении с моментом нагрузки $M_c(t)$; механическая частота вращения $\Omega(t)$.

2.2 Электромагнитные характеристики: потокосцепления фаз $\Psi(t)$.

2.3 Потери: электрические потери в фазах обмотки статора p_{CU1} ; магнитные потери в p_{FE} ; суммарные потери p_{Σ} .

2.4 Регулировочные характеристики: заданная и действующая частота вращения $\Omega_3(t)$, $\Omega(t)$; ошибка по частоте вращения $X_\Omega(t) = \Omega_3(t) - \Omega(t)$.

3. Оптимизационные. Программа рассчитывает оптимальную зависимость фазного тока, представленную как задание по току $I_3(\gamma)$, которая обеспечивает минимальные электрические потери и минимальную величину неравномерности момента, а также соответствующую этому токовому заданию функцию момента фазы $M_k(\gamma)$.

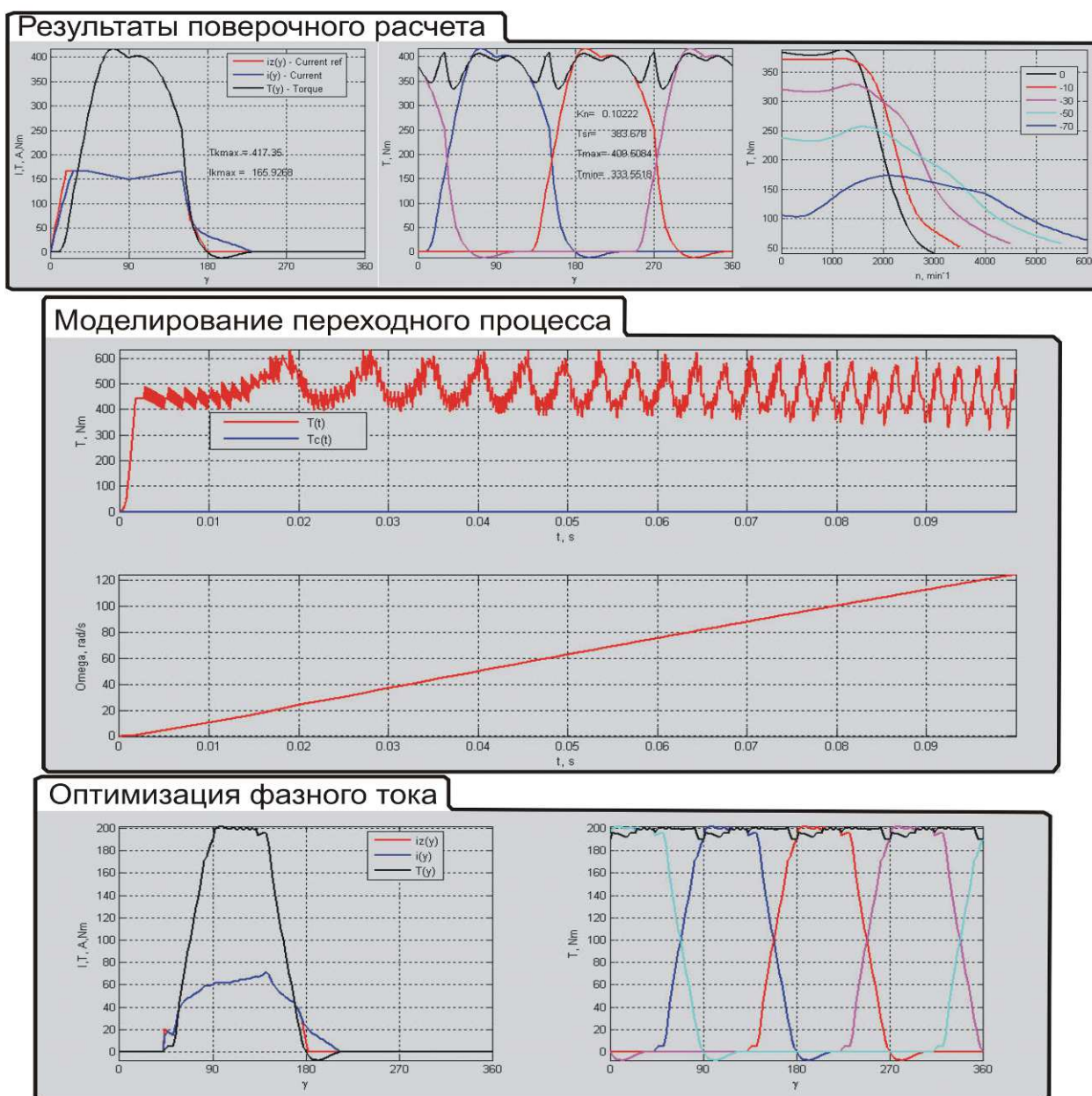


Рис. 8.4. Основные экранные формы программы расчета и моделирования электромеханических свойств ВИД **VIP_TA_1.0**

Программа обладает дружелюбным интерфейсом. Пользователю доступны только те кнопки, нажатие которых не приведет к неполному или некорректному выбору режима моделирования. Однако возможность задания пользователем некорректных численных параметров сохраняется. Основные экранные формы программы показаны на рис. 8.4

Программа "**ТЕР_5.3**" предназначена для расчета предельных нагрузочных характеристик частотно-регулируемых асинхронных электродвигателей с тремя вариантами охлаждения IC410, IC411, IC416 в заданном диапазоне частоты питания машины, требуемых ГОСТ Р 55136-2012/IEC/TS 60034-25:2007 от производителей.

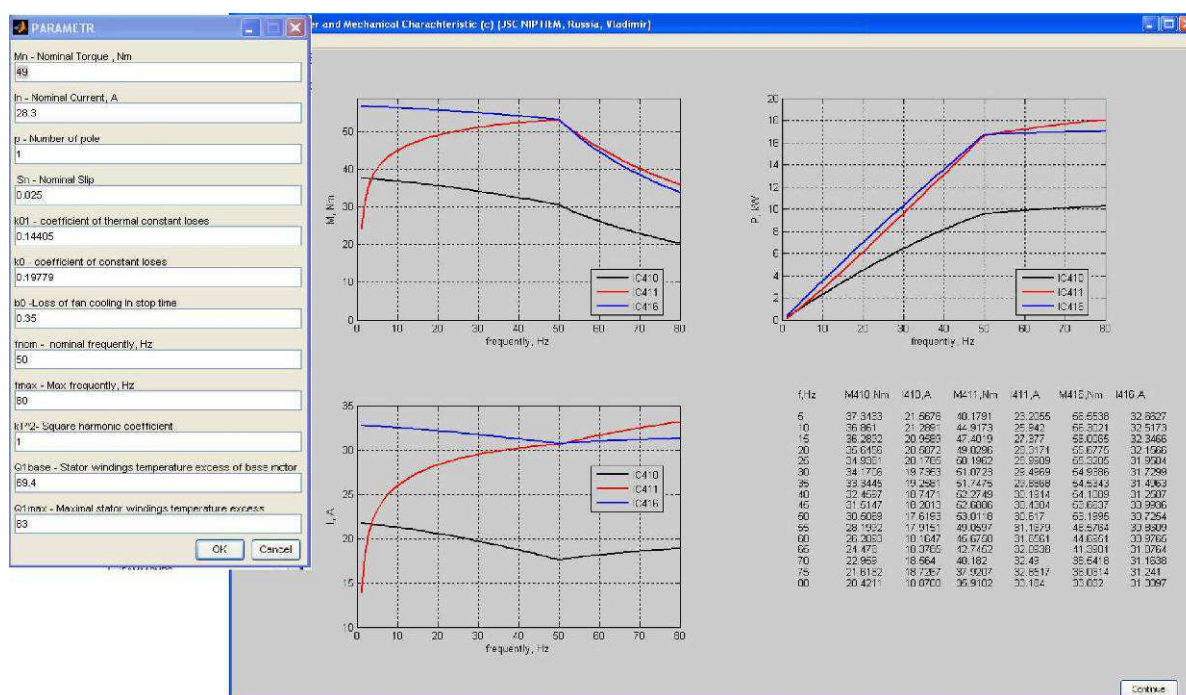


Рис. 8.5. Основные экранные формы программы расчета предельных нагрузочных характеристик

Данный программный продукт был разработан на основе оригинальной методики, теоретические основы которой изложены в параграфе 4.4. Библиотека параметров электродвигателей построена на основании экспериментальных данных, проводимых испытательными центрами ООО «ПК «ВЭМЗ» и ПАО НИПТИЭМ с 2001 по 2010 гг., и включает в себя данные закрытых обдуваемых электродвигателей с ВОВ 80-315мм, 2p=2-12.

Программа позволяет определять ограничения момента, тока, мощности от частоты питания асинхронных двигателей закрытой конструкции (IP54, IP55) в продолжительном режиме работы при заданной величине превышения температуры обмотки статора.

Программа обладает дружественным интерфейсом и легка в освоении. Окно ввода данных электродвигателя показано на рис. 8.5.

8.2 Разработка серий асинхронных двигателей для частотного регулирования

1. Частотно-регулируемые крановые электродвигатели.

Положения работы (параграфы 2.3, 4.4) были использованы при определении направления совершенствования активных частей частотно-регулируемых крановых двигателей, разработан каталог, машины этой серии (7FMTK) выпускаются серийно с 2013г. На рис. 8.6 показан общий вид электродвигателей и титульный лист технического каталога на них. Номенклатура разработанных частотно-регулируемых крановых электродвигателей охватывает машины с ВОВ 132-315мм, $2p=4,6,8,10,12$. При проведении работы впервые был использован аппарат скоростных характеристик, которые были введены в данные каталога. Структура и объем серии были определены в соавторстве с А.М.Зайцевым, А.С. Кобелевым, О.В. Кругликовым [67, 78, 80].

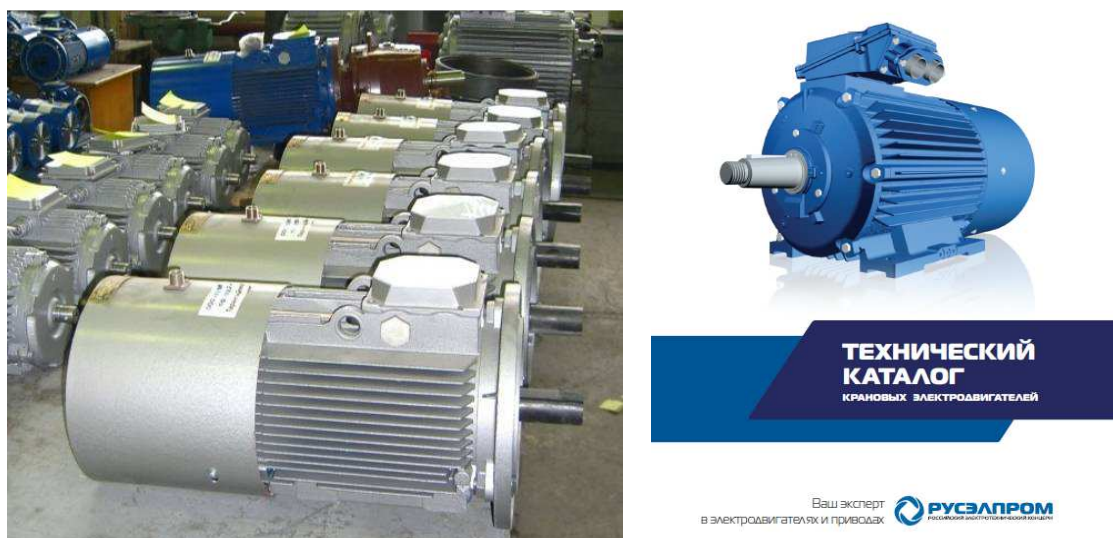


Рис. 8.6. Общий вид машин и обложка технического каталога на крановые электродвигатели серии 7FMTK

2. Создание безредукторных приводов для лифтов с грузоподъемностью до 1000 кг и скоростью перемещения кабины до 2 м/с, государственный контракт №8/З-686 Н-09.

На основе положений работы была предложена концепция и методика проектирования двигателей для мехатронных систем безредукторных лифтовых лебедок, основанная на использовании энергетического расчета. С применением разработанных программ и методик был проведен комплекс аналитических исследований, позволивших скорректировать проверочные расчеты в основных режимах работы. Основной объем работ по разработке двигателей АЧ200 был проведен О.В. Кругликовым на основе методического аппарата А.В. Захарова. Результаты исследований изложены в совместных работах [74, 76, 81]. Краткое изложение разработки, как примера использования алгоритма и методики энергетического расчета, приведено в параграфе 5.6.

В рамках проекта разработано более 14 типоразмеров электродвигателей, выпуск которых превысил 600 шт. На рис. 8.6 приведен общий вид одной из модификаций лифтовой безредукторной лебедки. Основные характеристики серии безредукторных лифтовых лебедок приведены в таблице 8.3.

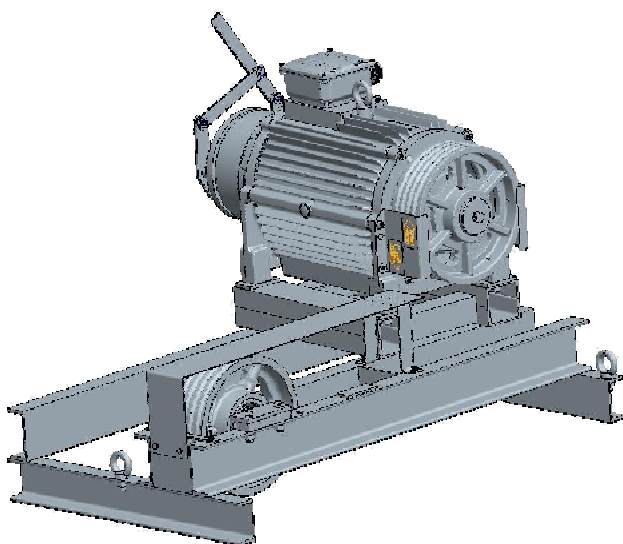


Рис. 8.7. Общий вид мехатронной системы лифтовой лебедки

Таблица 8.3. Номенклатура серии лифтовых электродвигателей

№ п/п	Тип	n , об/мин	M_H , Нм	M_M , Нм	G , кг	K	$D_{КВШ}$, мм
1	АЧ112МВ8	190	50		240	4:1	100
2	АЧ132S6	413	55	78	400	4:1	185
3	АЧ132М6	413	87	124	630	4:1	185
4	АЧ132М8	318	84	114	400	4:1	240
5	АЧ160М6	413	137	186	1000	4:1	185
6	АЧ160М8	159	145	206	400	2:1	240
7	АЧ160М8	207	110	157	400	2:1	185
8	АЧ160М8	207	174	248	630	2:1	185
9	АЧ180М8	120	177	254	400	2:1	320
10	АЧ180М8	159	224	319	630	2:1	240
11	АЧ200L8	60	350	505	400	1:1	320
12	АЧ200L8	159	357	487	1000	2:1	240
13	АЧ200LB8	120	270	481	630	2:1	320
14	АЧ200LC8	60	516	771	630	1:1	320
15	АЧ200LD8	120	423	660	1000	2:1	320

Примечание: в таблице приведены данные безредукторных лифтовых лебедок лифтов со скоростью перемещения кабины 1 м/с, кроме п.1, скорость перемещения которой 0,5 м/с. Обозначения: G , кг – грузоподъемность; K – кратность полиспаста; $D_{КВШ}$, мм – диаметр канатоведущего шкива.

3. Разработка вентильно-индукторных двигателей для нужд ЖКХ, ВИД80-2Н, ВИД90-2Н.

Проектирование машин было проведено на основе разработанной и представленной в диссертации методики расчета и моделирования электро-механических свойств вентильно-индукторного двигателя с использованием энергетических расчетов. Кроме того, положения приведенные в параграфах 4.3 и 5.3, были использованы при разработке методики и программы типовых и приемо-сдаточных испытаний.

В ходе работы было разработано и освоено производством 4 типоразмера, выпуск которых составил 120 шт. Изготовленные двигатели по проекту ОАО «МОЭК» были поставлены на центральные тепловые пункты ЖКХ г. Москвы. Чертеж общего вида электродвигателя и фотография активной части показаны на рис. 8.8. Основные характеристики серии вентильно-индукторных двигателей ВИД80, ВИД90 приведены в таблице 8.4.

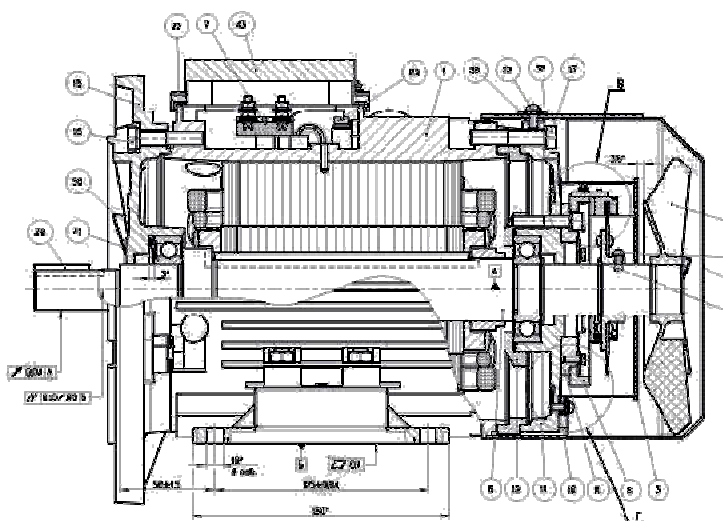


Рис. 8.8. Чертеж общего вида и фотография активной части электродвигателя ВИД80-2Н-2.2

Таблица 8.4. Основные параметры двигателей ВИД

Тип	P_2	z_1/z_2	$Da1$	L_1	$2p$	n	КПД	m_{CU}	m_{FE}	m_{Σ}
	кВт		мм			об/мин		кг		
ВИД80У-1.1	1,1	6/3	131	110	2	3000	86	2,5	6,4	16
ВИД80Н-1.1	1,1	8/4	131	100	4	3000	85	1,7	7,5	16
ВИД80Н-2.2	2,2	8/4	131	140	4	3000	87	2,3	10	22
ВИД80Н-3	3,0	8/4	149	140	4	3000	88	3,3	13	28

4. Электродвигатели серии 7AVE «Стандарт+».

При разработке технических условий на электродвигатели производства ООО «ПК «ВЭМЗ» серии 7AVE, адаптированных под питание от сети переменного тока и от электронных инверторов, была использована методика расчета предельных нагрузочных характеристик и соответствующая прикладная программа. Кроме того, положения, разработанные в параграфе 2.3, определили направление модификации «а» (которая была заменена брендом «Стандарт+») общепромышленных двигателей для их адаптации под работу в составе частотно-регулируемого электропривода. Серийный выпуск электродвигателей только одной из высот превышает 50 шт. в год.

5. Разработка частотно-регулируемых двигателей для буровых шарошечных станков СБШ 200, СБШ250 мощностью 90кВт, 110кВт.

Электродвигатели были разработаны на основании энергетического расчета с использованием предлагаемой в работе концепции проектирования, основанной на использовании скоростных характеристик. В рамках проекта также был разработан электродвигатель хода бурового станка с мощностью 45кВт. Выпущено более 10 шт.



Рис. 8.9. Электродвигатель привода шарошки АДЧРБ315М6

Характеристики двигателя привода шарошки бурового станка приведены в таблице 8.5. Фотографии бурового станка и электродвигателя АДЧРБ315М6 показаны на рис. 8.9.

Таблица 8.5. Характеристики АДЧРБ315МА6

Двигатель АДЧРБ315МА6-У1	
Номинальная мощность режим S1	120 кВт
Номинальный момент на валу двигателя	1090 Нм
Номинальная частота вращения	1100 об/мин
Максимальная частота вращения	1200 об/мин
КПД в номинальном режиме	95 %
Масса	955 кг
Габаритные размеры	
Диаметр (максимальный)	1200 мм
Длина (по корпусу)	800 мм
Технический уровень	
Удельная мощность	0,125 кВт/кг
Постоянная Арнольда	0,417 мЗ/кВт

6. Разработка электродвигателей АДВ215-100 мощностью 100/300кВт для исследовательского винтового прибора ВП-107 ФГУП ЦАГИ (г. Жуковский).

Разработка электродвигателей проводилась на основе применения базы данных энергетического расчета, представленной в главе 7. Моделирование ряда неноминальных режимов, возникших при пуско-наладке электродвигателей на объекте, проводилось в программе *AED_TA*.

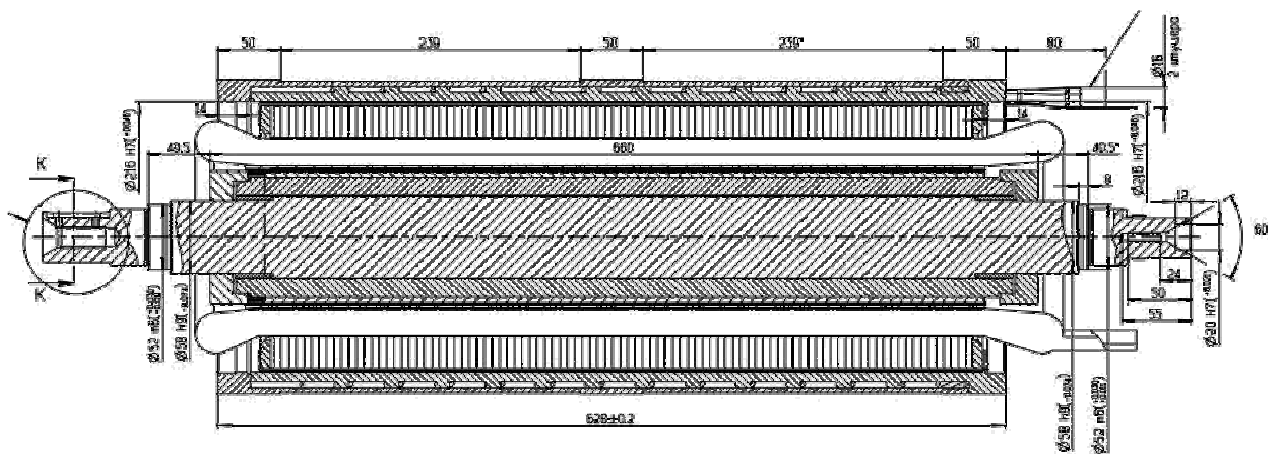


Рис. 8.10. Общий вид электродвигателя АДВ215-100

Электродвигатели выпускались с использованием оригинальной технологии изготовления ротора, выпуск составил 8шт. Чертеж общего вида электродвигателя АДВГ215 приведен на рис. 8.10. Основные характеристики сведены в таблицу 8.6.

Таблица 8.6. Характеристики АДВ215-100

Двигатель АДВ215-100	
Номинальная мощность режим S1 / S2	100 кВт / 300 кВт
Номинальный момент на валу двигателя	160 / 242 Нм
Номинальная частота вращения	5905 / 11850 об/мин
Максимальная частота вращения	14000 об/мин
КПД в номинальном режиме	93 %
Масса	225 кг
Габаритные размеры	
Диаметр (максимальный)	234 мм
Длина (по корпусу)	700 мм
Технический уровень	
Удельная мощность	0,44 / 1,33 кВт/кг
Постоянная Арнольда	0,310 / 0,20 м3/кВт

7. Рольганговые двигатели.

Разработка электродвигателей была проведена с использованием базы данных энергетического расчета и инструмента экспертной оценки использования штампов, рассмотренных в главе 7. Кроме того, в расчетах использовались статическая и динамическая тепловые модели. Разработаны двигатели габаритов 132, 160, 180, 280, 315. Выпускались электродвигатели с ВОВ 132-180 мм.

8. Разработка макета модуля электрогенерации с переменной частотой вращения вала турбогенератора, включающего преобразовательное оборудование, в рамках государственного контракта №12411.0810200.05.В07 от 23.05.2012 г. Шифр «ОСП» для ОАО «НПО «Сатурн» (г. Рыбинск).

В рамках проекта на основании методики энергетического расчета была разработана активная часть унифицированного асинхронного электродвигателя/электрогенератора для стенда выработки электрической энергии с переменной частотой вращения первичного вала. На основании анализа данных расчета специалистами ПАО «НИПТИЭМ» были сформулированы требования к силовому преобразователю системы электрогенерации: выпрямителю и инвертору для двигателя; активному выпрямителю и рекуператору для генератора. В таблице 8.7 приведены основные характеристики машины.

Таблица 8.7. Основные характеристики электродвигателя/ электрогенератора.

Двигатель 5AMHB250M2C-200-12000	
Номинальная мощность режим S1	200 кВт
Номинальный момент на валу двигателя	187 Нм
Номинальная частота вращения	10000 об/мин
Максимальная частота вращения	12000 об/мин
КПД в номинальном режиме	92 %
Масса	590 кг
Габаритные размеры	
Диаметр (максимальный)	630 мм
Длина (по корпусу)	1000 мм
Технический уровень	
Удельная мощность	0,34 кВт/кг
Постоянная Арнольда	0,515 м3/кВт

На рис. 8.11 показан общий вид стенда электрогенерации, на рис. 8.12 показана фотография образца.

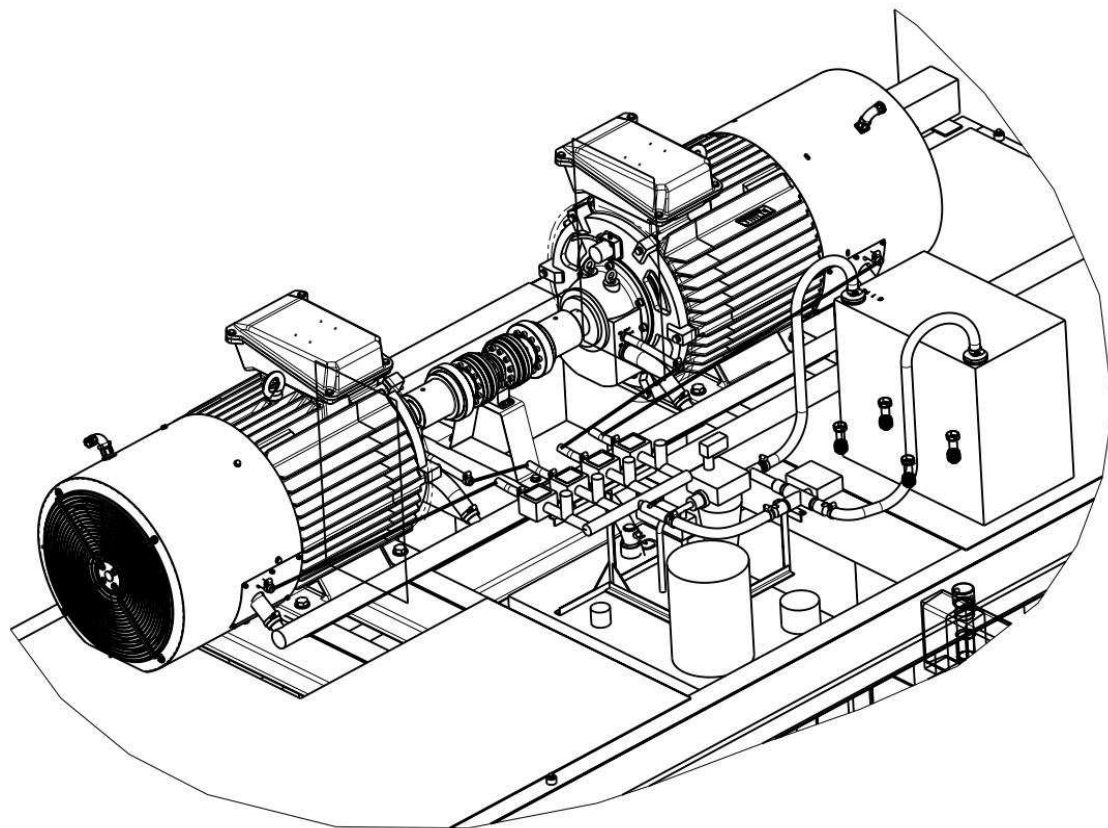


Рис. 8.11. Общий вид стенда электрогенерации



Рис. 8.12. Электродвигатель/ электрогенератор для стенда

8.3 Разработка специальных двигателей для гибридных транспортных средств

1. Комплект электрических машин тягового электрооборудования для гибридного городского автобуса 12 м.

Активные части электродвигателя ТАД250-260-У2 и генератора ТАГ250-280-У2 были разработаны на основе методики энергетического расчета, который был максимально использован в данном проекте, как в части энергетического анализа, так и в части энергетического синтеза. Скоростные характеристики использовались при расчете и анализе свойств электродвигателя. Параметры алгоритмов управления силовым преобразователем разрабатывались на основе методики оптимизации режима электропитания, приведенной в главе 5, для этого параметры оптимальных режимов системы передавались специалистам ООО «Русэлпром-Электропривод». Выпуск составил 6 комплектов, которые были поставлены на образцы транспортных средств.

На рис. 8.13 приведен общий вид и фотография разработанной электрической машины. Двигатель и генератор были изготовлены в одинаковых корпусах. На рис. 8.14 представлены фотографии транспортных средств, на которые устанавливались разработанные комплекты тягового электрооборудования (ВИТОВИТ-А420, БОГДАН-А70522 и др.).

В таблицу 8.8 сведены основные характеристики комплекта электрических двигателей. Электродвигатели имеют жидкостное охлаждение статора.

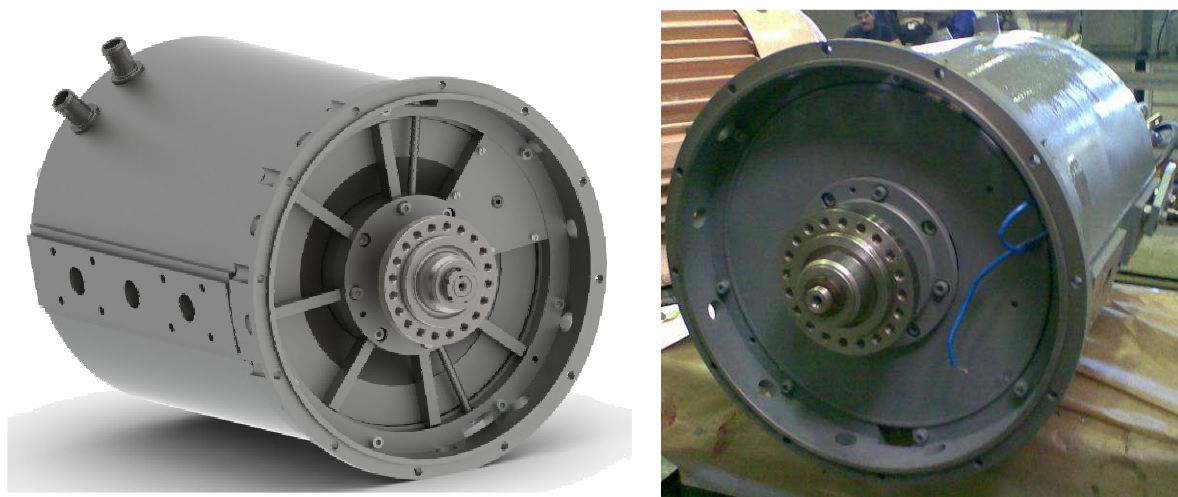


Рис. 8.13. Общий вид электродвигателя привода гибридного автобуса 12м

Таблица 8.8. Характеристики электрических машин ТАД250 и ТАГ250

Двигатель ТАД 250-260-У2		Генератор ТАГ 250-280-У2	
Номинальная мощность	120 кВт	Номинальная мощность	180 кВт
Номинальный длительный момент на валу двигателя	800 Нм	Номинальный длительный момент на валу генератора	1074 Нм
Номинальная частота вращения	1433 об/мин	Номинальная частота вращения	1600 об/мин
Максимальная частота вращения	3800 об/мин	Максимальная частота вращения	2600 об/мин
КПД в оптимальном режиме	93 %	КПД в оптимальном режиме	94 %
Масса	500 кг	Масса	520 кг
Габаритные размеры			
Диаметр	650 мм	Диаметр	700 мм
Длина	530 мм	Длина	530 мм
Технический уровень			
Удельная мощность	0,24 кВт/кг	Удельная мощность	0,35 кВт/кг
Пост. Арнольда	0,23 мЗ/кВт	Пост. Арнольда	0,23 мЗ/кВт



Рис. 8.14. Варианты гибридных автобусов 12м с электрическими машинами ТАД250, ТАГ250 производства ПАО «НИПТИЭМ»

2. Проект «Платформа».

При разработке силового электрогенератора для технического проекта транспортного средства специального назначения были использованы инструменты энергетического расчета. В результате было разработано три типоразмера генераторов для комплекта тягового электрооборудования. Основ-

ные параметры приведены в таблице 8.9. Проект не был реализован.

Таблица 8.9. Основные характеристики электрогенераторов

P_2 , кВт	$2p$	КПД	$Da1$, мм	L_1 , мм	n , об/мин	M , Нм
735	6	95	660	290	2500	2820
1103	6	97	660	460	2500	4220
1442	6	97	660	720	2500	5542

3. Технический проект вентильно-индукторного электродвигателя для привода оси трамвая.

Основные характеристики проектных вариантов электродвигателя с номинальной мощностью 55кВт сведены в таблицу 8.10. При разработке технического проекта научной группой (А.В. Захаров, А.Э. Кравчик, С.В. Кудряшов, В.А. Шабает) были предложены варианты исполнения привода оси трамвая на основе 3, 4, 6 фазных вентильно-индукторных электродвигателей [223]. Разработка активных частей проводилась с использованием методики расчета и моделирования вентильно-индукторного двигателя, а также динамической тепловой модели.

Таблица 8.10. Основные характеристики проектных вариантов

m	z_1/z_2	L_1 , мм	$Da1$, мм	$Di1$, мм	n , об/мин	$I_{\text{МАКС}}$, А	M , Нм	k_H , %	КПД, %
4	8/10	240	368	220	10	250	600	0,9	17,4
					1500	230	510	4,5	95,3
					4000	97	123	4	94,1
3	12/8	240	368	240	10	250	600	1	15,9
					1500	225	506	4,5	95
					4000	103	133	5	94,5
6	12/10	240	368	260	10	250	610	1	13,3
					1500	220	800	4,5	94,5
					4000	109	143	5	94,5
4	8/10	360	368	220	10	250	600	3,5	24,6
					1500	222	510	7	95,7
					4000	165	216	10	95,4
3	12/8	360	368	240	10	250	730	2	21
					1500	175	510	5,7	95,9
					4000	120	148	5,5	94,8
6	12/10	360	368	260	10	250	800	1,6	20
					1500	170	506	9	96
					4000	105	125	5	94,5

4. Проект тягового двигателя для вагона 81-760/761 «Ока» метropоезда для метрополитена г. Москва.

При работе над проектом был обнаружен факт существенного увеличения мощности магнитных потерь в разработанном электродвигателе ТАДВМ280-4У2. Для объяснения указанного факта автором была сформулирована гипотеза, представленная в главе 6. В соавторстве А.С. Кобелевым, С.В. Кудряшовым [83] указанная гипотеза была проверена и подтверждена [49]. Разработанная методика учета добавочных потерь, возникающих в оболочке машины, помогла улучшить характеристики электродвигателей за счет использования специальных конструктивных решений по оболочке и активной части. Кроме того, при проработке проекта, в рамках сравнения предлагаемого варианта с аналогами, использовались скоростные характеристики. На рис. 8.15 приведен общий вид электродвигателя ТАДВМ280-4У2 и фотография метropоезда, в котором данный электродвигатель устанавливается.



Рис. 8.15. Общий вид электродвигателя ТАДВМ280 привода метровагона и метropоезда, оснащаемого данным типом машины

5. Разработка экспериментального образца комплекта тягового электрооборудования машины гусеничной «ВИКИНГ-2».

Проектирование электродвигателя для специального транспортного средства осуществлялось с использованием методики энергетического расчета. Автором был выполнено моделирование электромеханических и управляющих процессов в системе при характерных режимах движения. Анализ результатов моделирования позволил скорректировать технические требова-

ния, предъявляемые к силовым компонентам. В рамках реализации проекта было изготовлено 2 макетных образца.

6. Разработка, изготовление и испытания экспериментального образца модуля асинхронизированного генератора, предназначенного для работы в составе лабораторной установки системы электродвижения, шифр «Мурена-АСГ».

Разработка комплекта электрооборудования стенда, предназначенного для макетирования системы электродвижения корабля, было проведено на основе использования энергетического расчета. Для этого ряд положений работы был адаптирован на применение в расчетах мехатронных систем с асинхронизированными генераторами (АСГ), выполненными на основе машин двойного питания, и синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ).

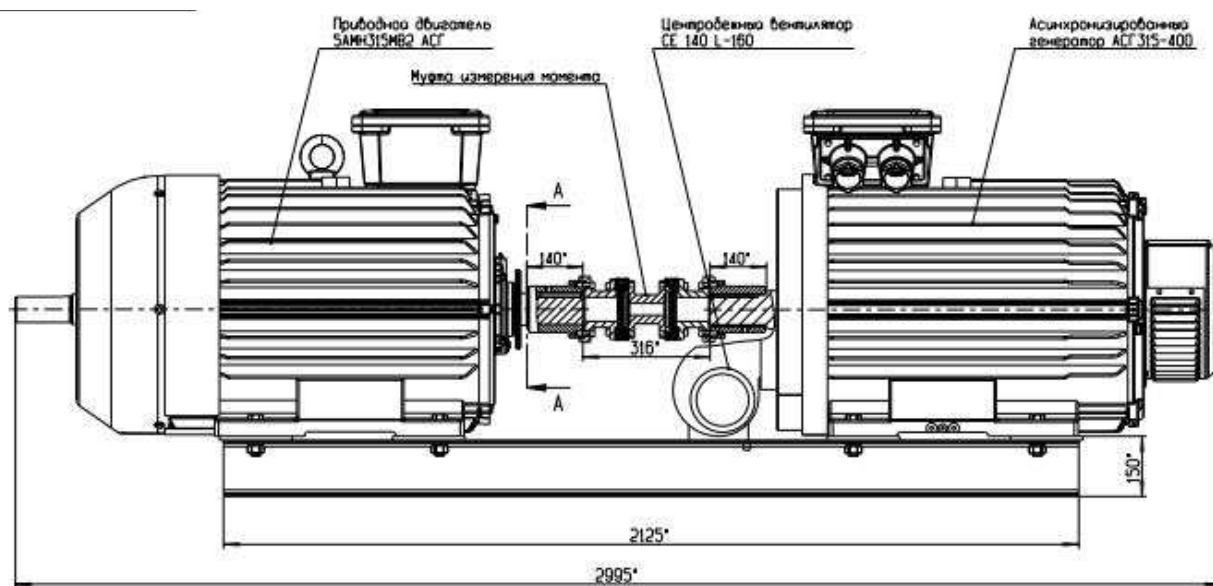


Рис. 8.16. Габаритный чертеж генераторной части стенда электродвижения

Важным этапом работы стала разработка оригинального алгоритма управления первичной обмоткой АСГ для генерации электропитания гребного двигателя. На рис. 8.16 показан общий вид генераторной части стенда электродвижения, включающий гонный двигатель, имитирующий работу судового дизеля, и асинхронизированный генератор на основе машины двойно-

го питания. На рис 8.17 показан общий вид двигательной части стенда, включающей в себя низкоскоростные синхронные электродвигатели с возбуждением от постоянных магнитов, имитирующие работу гребного двигателя. Основные характеристики разработанных электродвигателей сведены в таблицу 8.11.

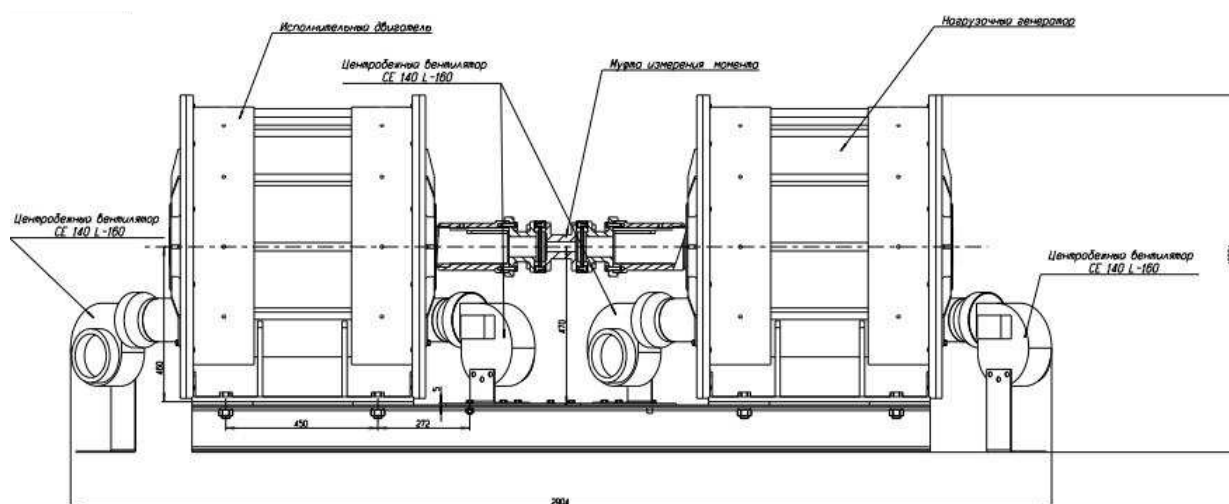


Рис. 8.17. Габаритный чертеж двигательной части стенда электродвижения

На рис. 8.18 показана структура системы электродвижения.

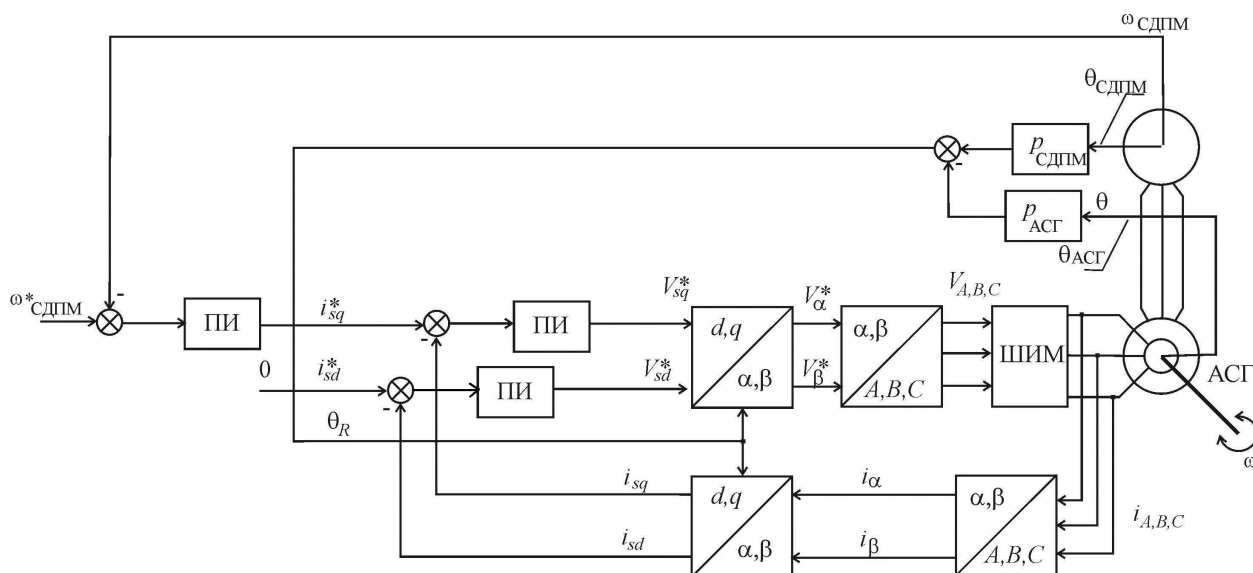


Рис. 8.18. Структурная схема системы электродвижения АСГ-СДПМ

Работа выполнялась по заказу ФГУП «Крыловский научный центр» филиал «Центральный научно-исследовательский институт судовой электро-

техники и технологии» (ЦНИИ СЭТ) в рамках поисковых исследований перспективных технологий электродвижения кораблей.

Таблица 8.11. Основные параметры электродвигателей стенда с АСГ

Тип	P_2	M	$2p$	U	I	КПД	$\cos\phi$	$Da1$	$Di1$	$L1$	$z1/z2$	m_{CU}	m_{FE}	m_M
	кВт	кНм		В	А	%		мм				кг		
АСГ	100		2	380/ 380 (Δ/Δ)	146/ 155	91	0,90	530	288	400	48/ 36	150	515	-
СДПМ1	120	5,7	40	236 (Y)	181	95	0,88	740	570	400	48	165	655	18
СДПМ2	120	5,7	16	170 (Y)	258	95	0,98	740	570	400	48	192	630	34

На рис. 8.19 показаны фотографии статора и ротора синхронного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов по проекту «Мурена - АСГ».



Рис. 8.19. Статор и ротор (магниты не установлены) СДПМ1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные в настоящей работе, позволили получить следующие новые результаты и сформулировать основные выводы:

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований особенностей работы двигателей переменного тока в составе мехатронных систем разработана новая технология проектирования двигателей, обеспечивающая максимальное согласование характеристик электрической машины с характеристиками преобразовательного, механического передаточного и информационно-управляющего компонентов системы в широком диапазоне изменения скоростей, нагрузок и параметров электропитания машин и их эффективное использование.

2. Разработанная новая методика энергетического расчета электромеханического преобразователя мехатронной системы обеспечивает проектирование электрической машины с оптимальным сочетанием параметров, определяющим соответствие ее регулировочных, энергетических и массогабаритных показателей при работе в составе мехатронной системы в заданной области скоростей и нагрузок. При этом экономия материалов, выраженная в себестоимости, при реализации электрических машин, спроектированных по новой методике, достигает 15% по сравнению с традиционными решениями.

3. Разработаны уточненные математические модели двигателей переменного тока (асинхронных и вентильно-индукторных), учитывающие нелинейные параметры схемы замещения: матрицы индуктивностей, сопротивлений и, ориентированные на исследование и проектирование машин переменного тока для мехатронных систем. Адекватность моделей подтверждена сравнением теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными в лабораторных условиях. Расчеты с использованием новых моделей позволяют снизить погрешность при определении

максимального пускового тока до 10%, максимального момента до 7%, пускового момента до 13%, которые при использовании моделей с линейными параметрами составляют, соответственно, 16%, 14%, 58%.

4. Предложены новые методики оценки технико-экономических характеристик двигателей переменного тока, основанные на анализе чувствительности конкретной электромеханической характеристики к себестоимости активной части машины и преобразователя частоты.

5. Разработаны новые методики расчета электромеханических характеристик и проектирования электродвигателей переменного тока (асинхронных и вентильно-индукторных), регламентирующие проверочные и проектные расчеты с учетом управления токами, напряжением, магнитным потоком, моментом и частотой вращения в системах со скалярным и векторным регулированием.

- Предложена новая методика проверочного электромагнитного расчета, в которой используемые в традиционных методиках основные входные данные: напряжение, частота, мощность принимаются выходными параметрами, а выходные параметры: ток, момент, частота вращения, магнитная индукция задаются во входных данных. Результаты проверочного расчета основных электромеханических параметров: индукций, токов, напряжения, потерь, КПД, представляются в виде скоростных характеристик, т.е. функций от частоты вращения. Погрешность вычисления при сравнении расчетных и экспериментальных данных не превышает 5% в расчете напряжения и частоты и 10% в расчете значения тока.

- На основе исследования физических процессов в машинах переменного тока при вытеснении в станину магнитного потока разработана модель, позволяющая оценить мощность добавочных потерь в конструктивных элементах. Это уточнение позволило снизить погрешность при расчете КПД в высоконагруженных машинах на величину до 2%.

6. Рассчитаны, проверены и внесены в информационную базу данных нелинейные параметры схемы замещения для общепромышленных

асинхронных электродвигателей производства концерна «Русэлпром» («ВЭМЗ», «НИПТИЭМ», «Русэлпром – СЭЗ») и других производителей. На основе анализа нелинейных зависимостей, входящих в базу характеристик (более 120 типоразмеров электродвигателей), установлено отсутствие подобия нелинейных характеристик машин, в том числе кривой намагничивания.

7. Разработаны новые математические модели вентильно-индукторных двигателей, использующие представление нелинейной функции потокоцепления как функции тока и угловой координаты – 360 эл. град., эффективные для моделирования и проектирования двухфазных вентильно-индукторных электродвигателей, в том числе при нелинейном токовом управлении.

8. Разработана трехмассовая тепловая модель электродвигателя, позволяющая выводить приближенные аналитические зависимости для расчета перегревов и предельных механических нагрузок. Определены основные коэффициенты модели для общепромышленных асинхронных электродвигателей производства ООО «ПК«ВЭМЗ» и ПАО «НИПТИЭМ». Получены аналитические зависимости, позволяющие рассчитывать средние значения превышения температуры обмотки статора и предельного длительного значения механической нагрузки в диапазоне частоты вращения $0,15 \leq n/n_H \leq 1,5$. Погрешность моделирования теплового переходного процесса с использованием данной модели не превышает 10 °С.

9. Сформулированы и обоснованы критерии для оптимизации режимов питания асинхронных электродвигателей: минимальные потери, минимальное превышение температуры обмотки статора, минимальное превышение температуры обмотки ротора, разработаны способы минимизации указанных функционалов. Показано, что у общепромышленных двигателей, используемых совместно с преобразователями частоты, величина превышения температуры обмотки статора может быть снижена на величину до 10%, что соответствует 8-9 °С,

при использовании оптимальных параметров питания в отличие от номинальных.

10. Сформулирована и решена задача оптимизации режимов питания вентильно-индукторного двигателя по критерию минимума электрических потерь при ограничении неравномерности суммарного электромагнитного момента с использованием метода динамического программирования Беллмана.

11. Получены оценки максимально возможной экономии объема материалов активных частей электродвигателей (в диапазоне мощностей 2.2кВт – 250кВт) при производстве, а также экономии электрической энергии при эксплуатации, получаемые при использовании электрических машин, разработанных на основе новой методики проектирования. Показано, что рациональное использование материалов активной части электродвигателей позволяет сэкономить до 25% активных материалов и до 6% установленной мощности силового преобразователя. Впервые указанная работа выполнена на отрезке серии машин, ограниченном ВОВ 112-315мм и $2p=2-8$.

12. Разработаны модифицированные радиальные геометрии активных частей электродвигателей (асинхронных, вентильно-индукторных), позволяющие оптимально использовать объем активной части машины.

Основные научные результаты были использованы в проектах концерна «Русэлпром» при разработке новых электродвигателей актуальных серий АДЧР, 7FMTK, 7AVE, предназначенных для работы в составе электропривода и мехатронных систем, а также электрических машин для гибридного и электротранспорта, энергоустановок, испытательного оборудования, горной техники. Разработанная концепция, методики и их реализация в виде программного обеспечения для ЭВМ были рекомендованы и используются на предприятиях концерна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированный электропривод / Под общ. ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 544 с.
2. Амбарцумова Т.Т. Многокритериальная оптимизация асинхронных двигателей с учетом динамики в программной среде MATLAB / Т.Т. Амбарцумова, Ле Куанг Кыонг // Электротехника, 2012, №11. – С.66-69.
3. Андрианов М.В. Экспериментальные исследования энергетических показателей частотно-регулируемых асинхронных двигателей, работающих от полигармонических источников напряжения / М.В. Андрианов, Р.В. Родионов // Электротехника, 2006, №11. – С.15-22.
4. Андрианов М.В. Применение метода отдельных потерь при определении КПД асинхронного двигателя, работающего от полигармонического источника напряжения / М.В. Андрианов, Р.В. Родионов // Электротехника, 2007, №6. – С.20-24.
5. Андрианов М.В. Особенности электропотребления комплектных приводов на базе преобразователей частоты с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором / М.В. Андрианов, Р.В. Родионов // Электротехника, 2002, №11. – С.46-49.
6. Андриенко В.М. Исследование параметров управляемых асинхронных двигателей / В.М. Андриенко К. Клингер // Электричество, 2006, №8. – С.41-44.
7. Асинхронные двигатели общего назначения / Под ред. В.М. Петрова, А.Э. Кравчика. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
8. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская.- М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
9. Архангельский Н. Л. Применение тензорной методологии к описанию электромагнитных процессов в асинхронном двигателе / Н.Л. Архангельский Б.С. Курнышев, П.А. Захаров // Электричество, 1995, № 2. – С.37-39.
10. Афонин В.И. Номинальная мощность двигателей серии 4А с повышенным скольжением в кратковременном и перемежающемся режимах / В.И. Афонин, В.А. Воробьев, М.В. Лисицкий, И.И. Сосницкий // Электротехническая промышленность. Сер. Электрические машины, 1984, Вып. 9 [163]. – С.7-9.
11. Баклин В.С. Математическая модель частотно-регулируемого асинхронного двигателя / В.С. Баклин, А.С. Гимпельс // Известия Томского политехнического университета, 2005, Т.308, №7. – С.148-152.
12. Башарин А.В. Управление электроприводами: учебное пособие / А.В. Башарин, А.В. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
13. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов. – М.: Наука, 1975. – 632 с.
14. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.
15. Бедфорд Б. Теория автономных инверторов / Б. Бедфорд, Р. Хофт / пер. с английского под ред. И.В. Антика. – М.: Энергия, 1969. – 280 с.

16. Беспалов В.Я. Перспективы создания отечественных электродвигателей нового поколения для частотно-регулируемого электропривода / В.Я. Беспалов // Северо-Западное электромеханическое объединение. Газета промышленного оборудования СПб.: Издательский дом «4 Рентгена», 01.11.2004. – С.1-2.
17. Беспалов В.Я. Основные направления совершенствования конструкции и технологии производства низковольтных асинхронных двигателей / В.Я. Беспалов, Л.Н. Макаров // Приводная техника, 2007, № 5. – С.14-19.
18. Беспалов В.Я. Импульсные перенапряжения в обмотках асинхронных двигателей при питании от ШИМ-преобразователя / В.Я. Беспалов, К.Н. Зверев / Электротехника, 1999, № 9. – С.56-59.
19. Беспалов В.Я. Разработка и освоение асинхронных электродвигателей энергоэффективной серии 7AVE: Некоторые итоги и дальнейшие задачи / В.Я. Беспалов, А.С. Кобелев, О.В. Кругликов, Л.Н. Макаров // Труды международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012, Иваново, 2012. С13-16.
20. Бешта А.С. Переходные процессы пуска асинхронного двигателя при питании от источника напряжения / А.С. Бешта, В.Э. Воскобойник, И.В. Шепилова // Наук. вісн. НГУ. Енергетика та автоматика, 2004, №3. – С.80-83.
21. Бойко И.Г. Основные принципы методики расчета теплового состояния асинхронных двигателей средней мощности с жидкостной системой охлаждения / И.Г. Бойко, А.Н. Омельченко, А.В. Кукулевский, Л.К. Шихова // Труды УкрНИИВЭ, 2011. – С.110-117.
22. Борисенко А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах / А.И. Борисенко, В.Г. Данько, А.И. Яковлев. – М.: Энергия, 1974. – 560 с.
23. Боченков Б.М. Оптимизация электропривода переменного тока по векторному критерию качества / Б.М. Боченков, Ю.П. Филюшков // Электричество, 2007, №8. – С.14-17.
24. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; под ред. И.Я. Браславского. – М.: изд. центр «Академия», 2004. – 236 с.
25. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Булгаков. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.
26. Бут Д.А. Основы электромеханики / Д.А. Бут. – М.: Изд-во МАИ, 1996. – 468 с.
27. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины / Д.А. Бут. – М.: Высш. Шк., 1990. – 416 с.
28. Бычков М.Г. Расчетные соотношения для определения главных размеров вентильно-индукторной машины / М.Г. Бычков, Р.С. Сусси // Электротехника, 2000, №3. – С.15-19.
29. Бычков М.Г. Электромеханические свойства и системы управления вентильно-индукторных электроприводов / М.Г. Бычков, А.Б. Красовский // Известия ТулГУ, 2010, выпуск 3, Ч.1.– С.229-235.

30. Ванеев Б.Н. Влияние составляющих экономического расчета на критерий оптимизации асинхронных двигателей / Б.Н. Ванеев // Труды УкрНИИВЭ, 2010. – С.174-180.
31. Вейнгер А.М. Регулируемый синхронный электропривод / А.М. Вейнгер. – М.: Энергоатомиздат, 1985.– 224 с.
32. Вейнреб К.Б. Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.09.01. – Краков, Москва, 2012. – 44 с.
33. Вершинин А.В. Разработка специальных конструктивных исполнений частотно-регулируемых асинхронных двигателей / А.В. Вершинин, М.С. Драгомиров, А.М. Зайцев, О.В. Кругликов // Электротехника, 2008, №11. – С.46-49.
34. Виноградов А.Б. Асинхронный электропривод общепромышленного назначения с прямым цифровым управлением и развитыми интеллектуальными свойствами / А.Б. Виноградов, В.Л. Чистосердов, А.Н. Сибирцев, Д.А. Монов // Известия вузов. Электромеханика, 2001, №3. – С.60-67.
35. Виноградов А.Б. Асинхронный электропривод общепромышленного назначения: учебное пособие / А.Б. Виноградов, В.Л. Чистосердов, А.Н. Сибирцев. – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т им В.И. Ленина, 2004. – 112 с.
36. Виноградов А.Б. Развитие теории и практическая реализация векторных электроприводов переменного тока с микропроцессорным управлением: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.09.03. – Иваново, 2012. – 307 с.
37. Виноградов А.Б. Минимизация пульсаций электромагнитного момента вентильно-индукторного электропривода / А.Б. Виноградов // Электричество, 2008, №2. – С.39-49.
38. Виноградов А.Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / А.Б. Виноградов // Электротехника, 2005, №5. – С.57-61.
39. Виноградов К.М. Моделирование электропривода с асинхронным двигателем в среде *Matlab* / К.М. Виноградов, И.С. Зиновьева // Автоматизация и информатизация в машиностроении: тематический сборник научных трудов. Южно-Уральский государственный университет, Филиал в г. Усть-Катаве. – Челябинск, 2015. – С. 42-47.
40. Вольдек А.И. Электрические машины: Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
41. Воронов А.А. Теория автоматического управления / А.А. Воронов, Д.П. Ким, В.М. Лохин и др. Часть 2. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления. – М.: Высшая школа, 1977. – 287 с.
42. Гаинцев Ю.В. Еще раз о вентильно-индукторном электроприводе / Ю.В. Гаинцев // Электротехника, 1998, №6. – С.25-27.
43. Гаинцев Ю.В. Новый экономичный регулируемый привод на основе управляемого реактивного двигателя / Ю.В. Гаинцев // ВНИПТИЭМ:

- Материалы всесоюзного научно-технического совещания «Регулируемые электродвигатели переменного тока». Владимир, 1988. – С.72-86.
44. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин / О.Д. Гольдберг. – М.: Высш. шк., 1990. – 255 с.
 45. Гольдберг О.Д. Проектирование электрических машин / О.Д. Гольдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко. – М.: Высш. шк., 1984. – 431 с.
 46. Гольдберг О.Д. Надежность электрических машин / О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 288 с.
 47. Геллер Б. Дополнительные поля, моменты и потери мощности в асинхронных машинах / Б. Геллер, В. Гамата. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 264 с.
 48. Герман-Галкин С.Г. *Matlab & Simulink*. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. – СПб: Корона-Век, 2011. – 368 с.
 49. Глинкин С.А. Экспериментальные исследования эффекта увеличения магнитных потерь в электродвигателях с оболочками из различных материалов / С.А. Глинкин, А.М. Зайцев, А.В. Захаров // Труды Международной конференции «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и компоненты», Алушта, Крым, 2014. – С.136-137.
 50. ГОСТ 7217-87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам. – 54 с.
 51. ГОСТ 24607-88. Преобразователи частоты полупроводниковые. Общие технические требования. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам. – 25 с.
 52. ГОСТ Р 54413-2011 Машины электрические вращающиеся. Часть 30. Классы энергоэффективности односкоростных трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (код IE). М.: Стандартинформ, 2012. – 54 с.
 53. ГОСТ 27803-88. Электроприводы регулируемые для станкостроения и робототехники. Общие технические требования. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам. М.: Гос. комитет СССР по стандартам. – 18 с.
 54. ГОСТ Р 51137-98. Электроприводы регулируемые асинхронные для объектов энергетики. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов. – 10 с.
 55. ГОСТ Р 51689-2000. Группа Е60. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные мощностью от 0.12 до 400 кВт. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 16 с.
 56. ГОСТ Р 52776-2007. Группа Е60. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики. – М.: Изд-во стандартов, 2008. – 36 с.
 57. ГОСТ Р 53480-2009. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 2009. – 27 с.
 58. Гурин Я.С. Проектирование серий электрических машин / Я. С. Гурин, Б.И. Кузнецов. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
 59. Гусев Б.Я. Диапазоны частотного регулирования и параметры асинхронных двигателей / Б.Я. Гусев // Труды ВНИИЭМ, 1976, Т.45. – С.135-140.
 60. Данилевич Я.Б. Добавочные потери в электрических машинах / Я.Б. Данилевич, Э.Г. Каширский. – М., Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 214 с.

61. Дартау В.А. Теоретические основы построения частотных электроприводов с векторным управлением / В.А. Дартау, Ю.П. Павлов, В.В. Рудаков и др. // Автоматизированный электропривод. – М.: Энергия, 1980. – С.93-101.
62. Дацковский Л.Х. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе (краткий аналитический обзор) / Л.Х. Дацковский, В.И. Роговой, В.И. Абрамов и др. // Электротехника, 1996, № 10. – С.18–28.
63. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / под ред. М.Г. Чиликина. – М.: Энергия, 1971. – 624 с.
64. Домбровский В.В. Асинхронные машины: Теория, расчет, элементы проектирования / В.В. Домбровский, В.М. Зайчик. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.
65. Загорский А.Е. Управление переходными процессами в электрических машинах переменного тока / А.Е. Загорский, Ю.Г. Шакарян. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 176 с.
66. Зайцев А.И. Дифференциальные уравнения для частотно-регулируемого асинхронного двигателя с учетом насыщения в системе координат α, β, γ / А.И. Зайцев, Д.А. Снегирев // Известия АИН им. А.М. Прохорова, 2005, Т.15. – С.44-47.
67. Зайцев А.М. Новая серия частотно-регулируемых асинхронных двигателей общего применения разработки ОАО «НИПТИЭМ» / А.М. Зайцев, А.В. Захаров, А.С. Кобелев, О.В. Кругликов // Электротехника, 2008, №9. – С.2-10.
68. Зайцев А.М. Состояние теоретических и практических работ по созданию асинхронных частотно-регулируемых электродвигателей средней мощности концерна «РУСЭЛПРОМ» / А.М. Зайцев, А.В. Захаров, А.С. Кобелев, О.В. Кругликов // Труды международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012, Иваново, 2012.- С34-37.
69. Захаров А.В. Двухфазные вентильно-индукторные двигатели. Конструкция, моделирование, управление / А.В. Захаров. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co, 2011. – 176 с.
70. Захаров А.В. Развитие программного обеспечения для моделирования режимов работы асинхронных электродвигателей в интеллектуальной системе автоматизированного проектирования / А.В. Захаров, А.С. Кобелев // Электричество, 2007, №5. – С.46-53.
71. Захаров А.В. Возможности применения прикладных программ моделирования и анализа переходных процессов в инженерных задачах проектирования асинхронного электропривода / А.В. Захаров // Электротехника, 2008, №4. – С.8-12.
72. Захаров А.В. Исследование эффективности применения специальных частотно-регулируемых электродвигателей в электроприводах центробежных насосов / А.В. Захаров, А.Л. Колосов // Электротехника, 2008, №11. – С49-52.
73. Захаров А.В. Определение превышений температур и допустимых нагрузок закрытых асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором,

- эксплуатируемых в широком диапазоне частоты вращения / А.В. Захаров, А.С. Кобелев, С.В. Кудряшов // Электричество, 2010, №12. – С.35-42.
74. Захаров А.В. Анализ энергетических характеристик асинхронных электродвигателей в приводе безредукторной лифтовой лебедки / А.В. Захаров, А.С. Кобелев, О.В. Кругликов // Электричество, 2012, №3. – С.35-40.
75. Захаров А.В. Целевые функции, используемые при оптимизации режимов питания частотно-регулируемых асинхронных двигателей / А.В. Захаров // Электротехника, 2012, №9. – С3-7.
76. Захаров А.В. Разработка конструкции безредукторных лифтовых лебедок с использованием метода дискретного программирования / А.В. Захаров, О.В. Кругликов, Ю.В. Чернышев // Электротехника, 2013, №5. – С36-40.
77. Захаров А.В. Программные комплексы имитационного моделирования и расчета электродвигателей для электропривода переменного тока / А.В. Захаров, А.С. Кобелев, С.В. Кудряшов // Труды международной конференции «Электропривод переменного тока». – Екатеринбург, 2007. – С.179-182.
78. Захаров А.В. Опыт разработки активных частей краново-металлургических асинхронных электродвигателей / А.В. Захаров, А.С. Кобелев, С.В. Кудряшов // Труды III международной научно-технической конференции «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы». – Екатеринбург, 2007. – С.42-47.
79. Захаров А.В., Малафеев С.И. Проектирование вентильно-индукторных электродвигателей для исполнительных механизмов / А.В. Захаров, С.И. Малафеев // Труды Международной научно-технической конференции «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии», Тольятти, 2009. – С.291-294.
80. Захаров А.В. Разработка активных частей новой серии асинхронных двигателей для частотно-регулируемого электропривода широкого применения / А.В. Захаров, А.С. Кобелев, С.В. Кудряшов // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии (XV Бернадосовские чтения)», Иваново, 2009. – С38-39.
81. Захаров А.В. Анализ энергетических характеристик тихоходных асинхронных электродвигателей с различными вариантами конструкции магнитопровода в приводе безредукторной лифтовой лебедки / А.В. Захаров, А.С. Кобелев, О.В. Кругликов // Сборник научных трудов IV международной научно-технической конференции «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы». Екатеринбург: УрФУ, 2011. – С.26-31.
82. Захаров А.В. Целевые функции, используемые при оптимизации частотно-регулируемых асинхронных электродвигателей / А.В. Захаров // Труды международной конференции «Электропривод переменного тока». – Екатеринбург, 2012. – С.11-14.

83. Захаров А.В. Влияние оболочки электрической машины на величину магнитных потерь / А.В. Захаров, А.С. Кобелев, С.В. Кудряшов // Труды международной конференции «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и компоненты». – Алушта, Крым, Украина, 2012. – С.101-103.
84. Захаров А.В. О задаче оптимального проектирования оболочки электродвигателей и деталей конструкции безредукторной лифтовой лебедки методом дискретного программирования / А.В. Захаров, О.В. Кругликов // Труды международной конференции «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и компоненты». – Алушта, Крым, Украина, 2012. – С.103-106.
85. Захаров А.В. Программный комплекс разработки и моделирования вентильно-индукторного электропривода / А.В. Захаров, С.В. Кудряшов // Труды конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике». Чебоксары, 2006. – С.105-106.
86. Захаров А.В. Упрощенная методика расчета превышения температуры обмотки статора регулируемого асинхронного электродвигателя, работающего в циклических режимах / Захаров А.В. // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Исследование, проектирование, испытание и эксплуатация информационно-измерительных устройств военной техники ПУВТ-2010». – М.: Издательство РАН, 2010. – С.64-67.
87. Зверев К.Н. Исследование волновых процессов в частотно-регулируемом асинхронном двигателе: автореферат дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.01. – М., 2000. – 20 с.
88. Зечихин Б.С. Автоматизированное проектирование асинхронных двигателей / Б.С. Зечихин, С.В. Журавлев. – М.: Изд-во МАИ, 2003. – 87 с.
89. Зюзев А.М. Термодинамическая модель асинхронного двигателя для электроприводов с интенсивными процессами тепловыделения / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Известия ТулГУ, 2010, Ч.1. – С.138-145.
90. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
91. Иванов-Смоленский А.В. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / А.В. Иванов-Смоленский, Ю.В. Абрамкин, А.И. Власов, В.А. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.
92. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Высшая школа, 1989. – 312 с.
93. Иванов-Смоленский А.В. Применение метода проводимостей зубцовых контуров к расчету магнитного поля и потокосцеплений насыщенной электрической машины с учетом двухсторонней зубчатости сердечников / А.В. Иванов-Смоленский, В.А. Кузнецов, В.А. Хвостов // Электромеханика, 1977, №3. – С.71-83.

94. Изосимов Д.Б. Алгоритмы цифрового векторного управления электромагнитным моментом асинхронного двигателя / Д.Б. Изосимов, С.Е. Рывкин, С.В. Байда // Электричество, 2005, №2. – С.37-41.
95. Изосимов Д.Б. Идентификация частоты вращения и составляющих вектора потокосцепления ротора по измерениям токов и напряжений обмоток статора / Д.Б. Изосимов, С.Е. Рывкин // Электричество, 2005, №4. – С.32-37.
96. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода / Н.Ф. Ильинский. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 224 с.
97. Ильинский Н.Ф. Вентильно-индукторный электропривод для легких электрических транспортных средств / Н.Ф. Ильинский, М.Г. Бычков // Электротехника, 2000, №2. – С.28-31.
98. Казаков Ю.Б. Конечно-элементное моделирование физических полей в электрических машинах / Ю.Б. Казаков, Ю.Я. Щелыкалов. – Иваново: Ивановский. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина, 2001. – 100 с.
99. Казаков Ю.Б. САПР машин постоянного тока на основе декларативных знаний с динамически формируемым алгоритмом расчета / Ю.Б. Казаков, А.И. Тихонов // Электротехника, 1997, № 4. – С.30-32.
100. Казаков Ю.Б. Влияние параметров широтно-импульсного регулирования напряжения на добавочные потери в асинхронных двигателях / Ю.Б. Казаков, В.А. Андреев // Электричество, 2008, №9. – С.40-45.
101. Казаков Ю.Б. Зависимость потерь в асинхронных двигателях от параметров широтно-импульсного регулирования напряжения / Ю.Б. Казаков, А.А. Шумин, В.А. Андреев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета, 2007, №3. – С.3-6.
102. Казаков Ю.Б. Моделирование энергоэффективности тягового асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения / Ю.Б. Казаков, Н.К. Швецов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета, 2013, №3. – С.23-27.
103. Касти Дж. Методы погружения в прикладной математике / Дж. Касти, Р. Калаба . – М.: Мир, 1976. – 224 с.
104. Ключев В.И. Теория электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергия, 1985. – 560 с.
105. Коршунов Ю.М. Математические основы кибернетики / Ю.М. Коршунов; 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 496 с.
106. Киреев А.В. Моделирование электромагнитных процессов в вентильно-индукторном электроприводе в математической системе MATHCAD/ А.В. Киреев, С.А. Крамсков // Изв. вузов. Электромеханика, 2003, №1. – С.42-46.
107. Кобелев А.С. Концепция разработки электромагнитного ядра асинхронных электродвигателей энергоэффективных серий / А.С. Кобелев, Л.Н. Макаров, А.М. Русаковский // Электротехника, 2008, №11. – С.11-24.
108. Кобелев А.С. Математическая модель электромагнитного расчета асинхронных электродвигателей для работы с алгоритмами оптимизации / А.С. Кобелев, С.В. Кудряшов // Электротехника, 2008, №11. – С.28-35.

109. Кобелев А.С. Организация расчетной САПР АД на базе системы экспертного программирования SPRUTEXPRO / А.С. Кобелев // Электротехника, 2005, №5. – С.16-21.
110. Кобелев А.С. Сопоставление электромеханических характеристик асинхронных двигателей с обмотками из «жестких» и «мягких» секций / А.С. Кобелев // Труды международной конференции «Электропривод переменного тока». – Екатеринбург, 2012. – С.15-18.
111. Коломейцев Л.Ф. Математическая модель для расчета электромагнитных процессов в многофазном управляемом реактивном индукторном двигателе / Л.Ф. Коломейцев, С.А. Пахомин и др. // Изв. вузов. Электромеханика, 1998, №1. – С.49-53.
112. Коломейцев Л.Ф. О влиянии чисел зубцов статора и ротора на характеристики трехфазного реактивного ИД / Л.Ф. Коломейцев, С.А. Пахомин // Изв. Вузов. Электромеханика, 1998, №2-3. – С.34-39.
113. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
114. Копылов И.П. Развитие методов и средств макро моделирования электрических машин / И.П. Копылов, Т.Т. Амбарцумова // Электротехника, 2007, №8. – С.19-24.
115. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
116. Костенко М.П. Электрические машины в 2-х частях. 3-е изд. / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский. – М.: Энергия, 1973.
117. Коськин Ю.П. Введение в электромеханотронику / Ю.П. Коськин. – С.Пб.: Энергоатомиздат, 1991. – 192 с.
118. Котеленец Н.Ф. Испытания и надежность электрических машин / Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов. – М.: Высшая школа, 1988. – 232 с.
119. Кояин Н.В. Оптимизация контуров регулирования систем электропривода по типовым методикам / Н.В. Кояин, О.П. Мальцева, Л.С. Удут // Известия Томского университета, 2005. Т.308, №7. – С.120-125.
120. Кравчик А.Э. Асинхронные электродвигатели новой серии 5А / А.Э. Кравчик, С.В. Пискунов, А.М. Русаковский, Е.А. Соболенская // Приводная техника, 1997, № 2. – С.31-32.
121. Кравчик А.Э. К вопросу о реализации положений федерального закона об энергосбережении применительно к низковольтным асинхронным двигателям общего применения / А.Э. Кравчик, А.М. Русаковский // Электротехника, 1997, №8. – С.40-43.
122. Кравчик А.Э. Электродвигатели с сервис-фактором / А.Э. Кравчик // Электротехника, 1996, №2. – С.54-55.
123. Кравчик А.Э. Выбор и применение асинхронных двигателей / А.Э. Кравчик, Э.К. Стрельбицкий, М.М. Шлаф. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 96 с.
124. Красовский А.Б. Исследование пульсаций момента в вентильно-индукторном электроприводе / А.Б. Красовский, М.Г. Бычков // Электричество, 2001, № 10. – С.33-44.

125. Кругликов О.В. Асинхронные частотно-регулируемые двигатели для привода безредукторных лебедок: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.01. – Москва, 2015. – 170 с.
126. Кузнецов В.А. Вентильно-индукторные двигатели / В.А. Кузнецов, В.А. Кузьмичев. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 70 с.
127. Кузнецов В.А. Дискретная математическая модель вентильно-индукторного двигателя / В.А. Кузнецов, А.В. Матвеев // Электричество, 2000, №8. – С.22-27.
128. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоудувных установках. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
129. Лезнов Б.С. Методика оценки эффективности применения регулируемого электропривода в водопроводных и канализационных установках. – М.: Машиностроение, 2011. – 88 с.
130. Марьин С.С. Разработка метода оценки долговечности изоляции низковольтных электрических машин: автореферат ... дисс. канд. техн. наук: 05.09.02. – Томск, 2007. – 22 с.
131. Мищенко В.А. Теория, способы и системы векторного и оптимального векторного управления электроприводами переменного тока / В.А. Мищенко. – М.: Издательство «Информэлектро», 2002. – 168 с.
132. Макаров В.Г. Асинхронный электропривод электромеханических систем с оптимальными режимами работы по критерию энергосбережения: автореферат дисс. ... д-ра техн. наук: 05.09.03. – Казань, 2011. – 42 с.
133. Макаров Л.Н. Разработка и освоение производства высокоэффективной конкурентоспособной серии асинхронных машин: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.09.01. – Москва, 2006. – 40 с.
134. Малафеев С.И. Математическая модель двухфазного вентильного индукторного двигателя / С.И. Малафеев, А.В. Захаров // Электротехника, 2004, №5. – С.31-35.
135. Малафеев С.И. Анализ электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя в мехатронной системе с нелинейным токовым управлением / С.И. Малафеев, В.А. Шабаетов, А.В. Захаров // Электротехника, 2006, №3. – С.37-42.
136. Малафеев С.И., Исполнительные механизмы на основе индукторных двигателей / С.И. Малафеев, А.В. Захаров // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2006, №12. – С.31-33.
137. Малафеев С.И. Исследование потерь в асинхронном двигателе с частотным регулированием при переходных процессах / С.И. Малафеев, А.В. Захаров // Электротехника, 2008, №7. – С.2-5.
138. Малафеев С.И., Моделирование тепловых переходных процессов в вентильно-индукторном двигателе / С.И. Малафеев, А.В. Захаров, С.В. Кудряшов // Электричество, 2009, №3. – С.54-57.
139. Малафеев С.И. Нелинейная модель двухфазного индукторного двигателя / С.И. Малафеев, А.В. Захаров // Проектирование и технология электронных средств, 2004, №2. – С.60-67.

140. Малафеев С.И. Синтез алгоритма управления фазным током вентильно-индукторного двигателя в мехатронной системе. / С.И. Малафеев, А.В. Захаров // Проектирование и технология электронных средств, 2005, №2. – С.19-24.
141. Малафеев С.И. Исследование и моделирование мехатронной системы на основе двухфазного вентильно-индукторного двигателя / С.И. Малафеев, А.В. Захаров // Производственные технологии и качество продукции: Материалы V Международной научно-технической конференции. – Владимир, 2003. – С.291-293.
142. Малафеев С.И. Компьютерное моделирование индукторного электропривода / С.И. Малафеев, А.В. Захаров // Вычислительная механика и современные прикладные программные системы: Материалы XIV Международной конференции. – М.: Вузовская книга, 2005. – С.308-310.
143. Малафеев С.И. Оптимальное управление моментом вентильно-индукторного двигателя/ С.И. Малафеев, А.В. Захаров // Тезисы к конференции по дифференциальным уравнениям. – Суздаль, 2006. – С.146-147.
144. Малафеев С.И. Моделирование тепловых переходных процессов в вентильно-индукторном двигателе / С.И. Малафеев, А.В. Захаров, С.В. Кудряшов // Вычислительная механика и современные прикладные программные системы: Материалы XVI Международной конференции. – М.: Вузовская книга, 2009. – С.504-507.
145. Малафеев С.И. Исследование и разработка мехатронных комплексов карьерных экскаваторов с электрическими машинами переменного тока / С.И. Малафеев, А.В. Захаров, А.А. Новгородов, Н.А. Серебренников // Труды международной конференции «Электропривод переменного тока». – Екатеринбург, 2012. – С.247-250.
146. Малафеев С.И. Теоретические и экспериментальные исследования характеристик двухфазного вентильно-индукторного двигателя / С.И. Малафеев, А.В. Захаров // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Материалы V Всероссийской научной конференции. – Чебоксары, 2003. – С.78-80.
147. Малафеев С.И. Двухфазный индукторный двигатель: математическая модель и алгоритмы управления / С.И. Малафеев, А.В. Захаров // Мехатроника, автоматизация, управление: Материалы I Всероссийской конференции с международным участием. – Владимир, 2004. – С.317-320.
148. Малафеев С.И. Динамическая модель вентильно-индукторного электропривода / С.И. Малафеев, А.В. Захаров // Труды конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике». – Чебоксары, 2006. – С.78-79.
149. Малафеев С.И. Компьютерное моделирование колебаний момента и скорости в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе / С.И. Малафеев, А.В. Захаров // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Материалы VII Всероссийской научной конференции. – Чебоксары, 2007. – С.318-320.

150. Малафеев С.И. Исследование и проектирование вентильно-индукторных двигателей для экскаваторного электропривода / С.И. Малафеев, А.В. Захаров // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Материалы VIII Всероссийской научной конференции. – Чебоксары, 2009. – С.295-296.
151. Малафеев С.И. Управление по критерию эффективного использования энергетических ресурсов в мехатронных системах: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.02.05. – Москва, 2002. – 439 с.
152. Мелкозеров П.С. Энергетический расчет систем автоматического управления и следящих приводов / П.С. Мелкозеров. – М.: Энергия, 1968. – 304 с.
153. Мехатроника / Пер. с япон. Т. Исии, И. Симояма, Х. Иноуэ и др. – М.: Мир, 1988. – 318 с.
154. Микропроцессорные системы автоматического управления / под ред. В.А. Бесекерского. – Л.: Машиностроение, 1988. – 365 с.
155. Михеев М.А. Основы теплопередачи. Изд. 2-ое стереотип./ Михеев М.А, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
156. Новиков С.Е. Исследование безредукторных электроприводов с частотно-управляемыми низкоскоростными асинхронными двигателями: автореферат дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.01. – Москва, 2011. – 16 с.
157. Обухов С.Г. Широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения / С.Г. Обухов, Е.Е. Чаплыгин, Д.Е. Кондратьев // Электричество, 2008, №7. – С.23-31.
158. ОСТ 16-801.302-85 Машины электрические вращающиеся от 40 до 355 габарита включительно. Двигатели асинхронные. Методика электромагнитных расчетов. – М.: Издательство стандартов, 1985.
159. ОСТ 16. 0.800.821-82 Машины электрические асинхронные мощностью свыше 1кВт до 400кВт включительно. Двигатели. Надежность. Расчетно-экспериментальные методы определения. М.: Издательство стандартов, 1982.
160. ОСТ16 15.201-86 Система разработки и постановки продукции на производство. Изделия электротехнической промышленности. Порядок выполнения ОКР. М.: Издательство стандартов, 1986.
161. Патент РФ №2266604. Двухфазный нереверсивный вентильно-индукторный двигатель. / С.И. Малафеев, А.В. Захаров. – Оpubл., 2005.
162. Патент РФ №024535281. Асинхронный высокомоментный электродвигатель на пониженную частоту вращения / М.И. Голембиовский, А.В. Захаров, А.С. Кобелев, О.В. Кругликов, Л.Н. Макаров, Р.В. Родионов. – Оpubл., 2011.
163. Патент США №4967066. High speed variable reluctance motor with equal tooth ratios / В.А.Chibu, М.Ф. Bent. – МКИ H02K 37/04. – Оpubл., 1990.
164. Патент РФ №2119227. Электропривод одноключевой / А.Д. Петрушин, В.И. Дейниченко. – Оpubл., 1998.
165. Патент США №4883999. Polythase electronically commutated reluctance motor, 1989 / Т.М. Jahns. – Оpubл., 1990.
166. Патент США №4986088. Fault-tolerant switched reluctance mashine / Т.М. Jahns. – Оpubл., 1990.

167. Патент США № 3679953. Compatible brushless reluctance motor and controlled switch circuits / B.D. Bedford. – Оpubл., 1972.
168. Патент РФ № 2089034. Нереверсивный двухфазный электродвигатель с переменным магнитным сопротивлением / В.А. Шабает. – Оpubл., 1997.
169. Петрушин А.Д. Энергосберегающие вентильно-индукторные и асинхронные электроприводы для подвижного состава / А.Д. Петрушин. – Ростов-на-Дону: Изд-во Северо-Кавказского научного центра, 1999. – 79 с.
170. Петрушин А.Д. Вентильно-индукторный привод: опыт разработки и внедрения // Приводная техника, 1998, №2. – С.12-13.
171. Петрушин В.С. Универсальная тепловая схема замещения асинхронных двигателей / В.С. Петрушин, А.М. Якимец // Электромашинобуд та електрообладан., 2002, вип.59. – С.75-79.
172. Петрушин В.С. Тепловые расчеты нестационарных режимов работы асинхронных двигателей регулируемых электроприводов / В.С. Петрушин, А.М. Якимец, В.Л. Кобрин // Електротехніка і улектромеханіка, 2003, №4. – С.65-68.
173. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе: учеб. пособие / В.С. Петрушин. Одесса: Наука и техника. 2006. – 320 с.
174. Подураев Ю.В. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем / Ю.В. Подураев, В.С. Кулешов // Мехатроника, 2000, №1. – С.5-10.
175. Подураев Ю.В. Основы мехатроники. Учебное пособие.– М.: МГТУ «СТАНКИН». – 2000. – 80 с.
176. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
177. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых приводах / А.Д. Поздеев. – Чебоксары: ЧувГУ. – 1998. – 172 с.
178. Полковников В.А. Электрические, гидравлические и пневматические приводы летательных аппаратов и их предельные динамические возможности/ В.А. Полковников. – М.: Изд-во МАИ, 2002. – 452с.
179. Поляков В.Н. Экстремальное управление электрическими двигателями / В.Н.Поляков, Р.Т. Шрейнер; под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Р.Т. Шрейнера. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. – 420с.
180. Попов В.И. Частотно-регулируемые асинхронные двигатели для трехфазного лифтового электропривода / В.И. Попов // Электричество, 2006, №8. – С.60-64.
181. Постников И.М. Проектирование электрических машин / И.М.Постников. – Киев: Гос. изд.технической лит. УССР, 1960. – 912 с.
182. Потапов А.М. Настройка и испытания следящих приводов / А.М. Потапов. – Л.: Энергия, 1970. – 104 с.
183. Преобразователи частоты ОУМС (Omron Yaskawa Motion Control). Каталог продукции, 2010.
184. Преобразователи частоты Vacon. Руководство. Справочник. – UD98M, 2000. – 280 с.

185. Приводы переменного и постоянного тока, сервоприводы и двигатели. Технический каталог Control Techniques, 2002. – 102 с.
186. Проектирование электрических машин. В 2-х кн.: кн.1/ И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Молодкин, Б.Ф. Токарев; под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 464 с.
187. Пронин М.В. Моделирование систем с асинхронными машинами и транзисторными преобразователями с учетом потерь энергии / М.В.Пронин, А.Г. Воронцов, В.В. Терещенков // Известия вузов. Электромеханика, 2008, №3. – С.33-38.
188. РД 16.310-86 Машины электрические вращающиеся средние свыше 56 до 355 габарита включительно. Двигатели асинхронные. Методика тепловых расчетов. М.: Издательство стандартов, 1986.
189. Рудаков В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 134 с.
190. Руководство по использованию КЕВ COMBIVERT. Part No.:00.F5.MEA-K260. – КЕВ Antriebstechnik, 2003.
191. Русаковский М.А. Асинхронные низковольтные частотно-регулируемые электродвигатели серий АДЧР, ВА, 7AVE в частотно-регулируемом электроприводе / М.А. Русаковский, А.Л. Колосов, А.В. Захаров, А.С. Кобелев // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч: Изд-во ТулГУ, 2010, Ч. 4. – С.168-174.
192. Сабинин Ю.А. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы / Ю.А. Сабинин, В.Л. Грузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 126 с.
193. Садовский Л.А. Электродвигатели с переменным магнитным сопротивлением для современного регулируемого электропривода / Л.А. Садовский, В.Л. Виноградов // Электротехника, 2000, №2. – С.54-58.
194. Самарский А.А. Численные методы / А.А. Самарский, А.В. Гулин . – М.: Наука, 1989. – 432 с.
195. Сандлер А.С. Частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М., Л.: Энергия, 1966. – 144 с.
196. Сергеев П.С. Проектирование электрических машин / П.С. Сергеев, Н.В. Виноградов, Ф.А. Горяинов. – М.: Энергия, 1969. – 632 с.
197. Силовые полупроводниковые приборы / перевод с англ. под ред. В.В. Токарева. – Воронеж, 1995. – 660 с.
198. Сипайлов Г.А. Электрические машины (специальный курс): Учеб. для вузов / Г.А. Сипайлов, Е.В. Кононенко, К.А. Хорьков. – М.: Высш. шк., 1987. – 287 с.
199. Слежановский О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
200. Смит Джон М. Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей / Пер. с англ. Н.П. Ильиной; под редакцией О.А. Чембровского. – М.: Машиностроение, 1980. – 271 с.

201. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.
202. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева, А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
203. Справочник по преобразовательной технике / Под ред. И.М. Чиженко. – Киев: Техника, 1978. – 447 с.
204. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
205. Справочник по электрическим машинам. В двух томах / Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Том 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
206. Справочник по электрическим машинам. В двух томах / Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Том 2. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.
207. Стандартные приводы АББ (AC550, 0.75-355 кВт). Технический каталог. – ABB, ADVLOC1505CAT07JRU, 2007.
208. Суворов Н.И. Исследование коммутационных перенапряжений и их влияния на надежность изоляции низковольтных асинхронных двигателей: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.01. – М., 1973. – 211 с.
209. Теряев Е.Д. Мехатроника как компьютерная парадигма развития технической кибернетики / Е.Д. Теряев, Н.Б. Филимонов, К.В. Петрин // Мехатроника, автоматизация, управление, 2009, №6. – С.2-10.
210. Технический каталог ОАО «ВЭМЗ». – Владимир, 2000. – 74 с.
211. Технический каталог ОАО «НИПТИЭМ» – Владимир, 2009. – 40 с.
212. Технический каталог ОАО «ВЭМЗ-СПЕКТР». – Владимир, 2000. – 20 с.
213. Тихонов А.И. Разработка моделей и методов анализа и синтеза решений в автоматизированном проектировании электромеханических устройств: автореферат дисс ... д-ра техн. наук: 05.12.13, Иваново, 2007г. – 40 с.
214. Трещев И.И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока / И.И. Трещев. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. – 344 с.
215. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро / Под ред. В.И. Радина. – М.: Энероатомиздат, 1990. – 416 с.
216. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 95 с.
217. Филюшков Ю.П. Оптимизация электромагнитных процессов в асинхронной машине с короткозамкнутым ротором / Ю.П. Филюшков // Электричество, 2011, №5. – С.42-47.
218. Холл Дж. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / Дж. Холл, Дж. Уатт. – М.: Мир, 1979. – 312 с.
219. Чемоданов Б.К. Следящие приводы. Книга первая / Б.К. Чемоданов. – М.: Энергия, 1976. – 480 с.
220. Чемоданов Б.К. Следящие приводы. Книга вторая / Б.К. Чемоданов. – М.: Энергия, 1976.- 384 с.
221. Шабаев В.А. Экспериментальное исследование двухфазных непереворсивных вентильно-индукторных двигателей / В.А. Шабаев, А.В. Захаров // Электротехника, 2003, №2. – С.44-47.

222. Шабаев В.А. Двухфазный нереверсивный вентильный индукторный двигатель. / В.А. Шабаев, Н.И. Лазарев, А.В. Захаров // Вестник УПИ №5(25). – Екатеринбург, 2003. – С.17-19.
223. Шабаев В.А. Алгоритмы управления вентильно-индукторным электроприводом, обеспечивающие уменьшение неравномерности электромагнитного момента / В.А. Шабаев, М.В. Лазарев, А.В. Захаров // Электротехника, 2005, №5. – С.54-56.
224. Шелехова Т.С. Обеспечение качества при производстве и эксплуатации асинхронных рольганговых двигателей: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.01. – Томск, 1984. – 218 с.
225. Шрейнер Р.Т. Электроприводы переменного тока на базе непосредственных преобразователей частоты с ШИМ / Р.Т. Шрейнер, А.И. Калыгин, В.К. Кривовяз; под ред. Р.Т. Шрейнера. – Екатеринбург: РГПУ, 2012. – 223 с.
226. Шрейнер Р.Т. Координатная стратегия управления непосредственными преобразователями частоты с ШИМ для электроприводов переменного тока / Р.Т. Шрейнер, В.К. Кривовяз, А.И. Калыгин // Электротехника, 2003, №6. – С.39-47.
227. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
228. Шрейнер Р.Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Р.Т. Шрейнер, Ю.А. Дмитриенко. – Кишинев: ШТИИИИЦА, 1982. – 224 с.
229. Шрейнер Р.Т. Электромеханические и тепловые режимы асинхронных двигателей в системах частотного управления / Р.Т. Шрейнер, А.И. Калыгин, И.В. Кривовяз; под ред. Р.Т. Шрейнера. – Екатеринбург, 2008. – 361 с.
230. Шубенко В.А. Влияние электромагнитных переходных процессов на динамику и надежность металлургических асинхронных приводов, работающих с большой частотой пусковых и тормозных включений / В.А. Шубенко // Материалы конференции по электроприводу и автоматизации технологических процессов металлургических предприятий, Металлургиздат, 1957.
231. Шуйский В.П. Расчет электрических машин (пер. с немецкого). – Л.: Энергия, 1968. – 732 с.
232. Соколов М.М. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе / М.М. Соколов, Л.П. Петров, Л.Б. Масандилов, В.А. Ладензон. – М.: Энергия, 1967г. – 200 с.
233. Эпштейн И.И. Автоматизированный электропривод переменного тока / И.И. Эпштейн. – М.: Энергоиздат, 1982. – 192 с.
234. Яцук В.Г. Колебания асинхронного двигателя при частотном управлении / В.Г. Яцук, Ю.Н. Калачев, С.В. Бондарев // Труды международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012. – Иваново, 2012. – С.78-81.

235. A Three-phase Induction Motor Problem / Anisoft RMxprt Application Note.- AP067-9911.
236. Bertotti, G. Space time correlation properties of the magnetization process and eddy current losses // *Journal of Applied Physics*, 1984, Vol. 55, No.12. – P.4339-4355.
237. Bertotti, G. Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials // *Journal of Applied Physics*, 1985, Vol. 57, No. 6. – P.2110-2126.
238. Bertotti, G. Dynamic generalization of the scalar Preisach model of hysteresis // *IEEE Trans. Magn.*, 1992, Vol. 28, No. 5. – P.2599-2601.
239. Birbir Y., Nogay H.S. Voltage and current harmonic variation in three-phase induction motors with different stator coil pitches // *International journal of energy*, 2007, I4, Vol.1. – P.122-129.
240. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage fur die Tranvector - Regelung von Drehfeldmaschinen // *Siemens Z*, 1971, Vol. 45. – 757 p.
241. Blaschke F. Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Asinchronmaschinen // *Siemens F*, 1972, Vol. 1. – P.184-193.
242. Boglietti A., Cavagnino A., Mario Lazzari M. Computational Algorithms for Induction-Motor Equivalent Circuit Parameter Determination—Part I: Resistances and Leakage Reactances // *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 2011, Vol. 58, No. 9. – P.3723-3733.
243. Boglietti A., Cavagnino A., Mario Lazzari M. Computational Algorithms for Induction-Motor Equivalent Circuit Parameter Determination—Part II: Skin Effect and Magnetizing Characteristics // *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 2011, Vol. 58, No. 9. – P.3734-3740.
244. Bose B.K., Miller T.J. at al. Microcomputer control of switches reluctance motor // *Conf. rec. IEEE – IAS. – Pittsburg - New York*, 1988, Pt.1. – P.542-547.
245. Buja G., Casadei D., Serra G. Direct torque control of induction motor drives // *Proceedings of the 1997 International Symposium on Industrial Electronics. – Guimarres*, 1997. – P. TU2-TU8.
246. DeBortoli M.J., Salon S.J., Burow D.W., Slavik C. J., Effects of rotor eccentricity and parallel windings on induction machine behavior: a study using finiteelement analysis // *IEEE Trans. Magn.*, 1993, Vol. 29, No. 2. – P.1676-1682.
247. Dunlop G.R. A switched-reluctance motor drive with zero torque ripple and a constant inverter bus current // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1995, Vol. 208, No.1. – P.61-68.
248. Dong G. Sensorless and efficiency optimized induction machine control with associated converter PWM modulation schemes: Ph.D. Thesis. – Tennessee Technological University, 2005. – 300 p.
249. Fahmi B., Toliyat H.A. Reconfigurable Motor Drives and Power Electronics Based Architectures for Military Vehicles. – Texas A&M University.
250. Filippich M. Digital Control of a Three Phase Induction Motor: E.E. Thesis. – The University of Queensland. 2002. – 60 p.
251. Florentsev S.N. From Russia with Automotive. AC electric drive-train of a hybrid city bus // *Power System Design Europe (PSDE)*, July/August 2009. – P.50-51.
252. Florentsev S.N. Traction Electric Equipment Set for AC Electric Transmission Various Vehicles//*Proceedings of International Exhibition & Conference Power*

- Electronics, Intelligent Motion. Power Quality (PCIM-2009). 12-14 May 2009. – Nuremberg, Germany. P.625-627.
253. Gimesnez R.B. High Performance Sensorless Vector Control of Induction Motor Drives: Ph.D Thesis. – University of Nottingham, 1995. – 255 p.
 254. Ho S.L. Fu W.N. Analysis of indirect temperature-rise test of induction machines using time stepping finite element method. // IEEE Trans. Energy Conversion, 2001, Vol.16, No.1. – P.55-60.
 255. Holtz J. Sensorless Control of Induction Motor Drives/ IEEE Proceedings, 2002, Vol. 90, No.9. – P.1359-1394.
 256. Hsu J.S., Liou S.P., Lin B.T., Weldon W.F. Losses influenced by third harmonic flux in induction motor // IEEE Trans. Energy Conversion, 1991, Vol.6, No.3. – P.461-468.
 257. IEC TS 60034-25. Rotating electrical machines – Part 25: AC electrical machines used in power drive systems – Application guide. 2014-10. –86 p.
 258. Kessler C. Ein Beitrag zur Theorie mehrschleifiger Regelungen // Regelungstechnik, 1960, №8,8. – P.261-266.
 259. Kirschen, Novotny D.W., Lipo T.A. Optimal efficiency control of an Induction Motor Drive // IEEE Trans. Energy Conversion, 1987, Vol. EC-2, No.1. – P.70-76.
 260. Kim J., Brayant M.D. Bond graph model of a squirrel cage induction motor with direct physical correspondence // Journal of dynamic system, measurement, and control, 2000, Vol.122. –P.461-469
 261. Kim J.-W., Kim B.-T., Kwon B.I. Optimal stator slot design of inverter-fed induction motor in consideration of harmonic losses // IEEE Trans. Magn., 2005, Vol.41, No.5. – P.2012-2015.
 262. Krishnan R. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design and application. – CRC Press, 2001.
 263. Krishnan R. Electric motor drives modeling, analysis and Control. – New Delhi: PHI Pvt. Ltd, 2003.
 264. Lawrenson P.J., Ray W.F. at al. Controlled-speed switched-reluctance motor: present status and future potential / European conference of electrical drives, motor, controls, 1982, Leeds.– P.23-31.
 265. Lawrenson P.J., Stephenson J.M. at al. Variable speed switched-reluctance motor systems // IEEE Proceedings, 1981, Vol.128, Pt.B, No.5. – P.260-269.
 266. Lawrenson P.J., Stephenson J.M. at al. Variable-speed switched reluctance motors // IEEE Proceedings, 1980, Vol.127, Pt.B, No.4.- P.253-265.
 267. Leonhard W. Control of Electrical Drives. – Berlin: Springer-Verlag, 1990.
 268. Leonard W. Introduction to AC motor control using field coordinates // Symposium Sulla Evoluzione Dinamica della Machina Electriche Rotatani, Tirrenia, 1975.
 269. Liao Y., Lipo T.A. Effect of saturation third harmonic on the performance of squirrel-cage induction machines. Department of electrical and computer engineering university of Wisconsin-Madison, 1994.-18 p.
 270. Liuzzi G. Multi-objective Optimization Techniques for the Design of Induction Motors / G.Liuzzi, S. Lucidi, F. Parasiliti, M. Villani // IEEE Trans. Magn, 2003, Vol.39, No.3. – P.1261-1264.

271. Lorenz R.D. Tuning of field-oriented induction motor controllers for high-performance applications // IEEE Trans. Ind. Appl., 1986, Vol. IA-22, No.2. – P.293-297.
272. Lorenz R.D. Lawson D.B. A simplified approach to continuous on-line tuning of field orientated induction machine drives // IEEE Trans. Ind. Appl., 1990, Vol.26, No.3. – P.420-424.
273. Mang X., Krishnan R. at al. Design and performance of an interactive personal computer controller for switched reluctance motor drives // Conf. rec. IEEE – IAS. – Pittsburg – New York, 1988, Pt.1. – P.515-519.
274. Mangal M., De G. Novel control strategy for sinusoidal PWM inverters // IEEE Trans. Ind. Appl., 1987, Vol. IA-23, No. 3. – P.561-566.
275. Manzer D.G. Varghese M. at al. Variable reluctance motor characterization // IEEE Trans. Industrial Electronics, 1989, Vol.36, No.1. – P.56-63.
276. Melkebeek J, Novotny D. The influence of saturation on induction machine drive dynamics // IEEE Trans. Ind. Appl., 1983, IA-19, № 5. – P.671-681.
277. Micromaster 410/420/430/440. Catalogue of production DA 51.2, SIEMENS, 2004.
278. Miller T. Switched reluctance motors and their control. – Oxford, 1993. – 200 p.
279. Milimonfared J., Kelk H.M., at al. A Novel Approach for Broken-Rotor-Bar Detection in Cage Induction Motors // IEEE Trans. Ind. Appl., 1999, Vol.35, No.5. – P.1000-1006.
280. Moallem M., Ong C.M. Predicting the torque of a switched reluctance machine from its finite element field solution // IEEE Trans. Energy Conversion, 1990, Vol.5, No.4. – P.733-739.
281. Mohan N. Advanced Electric Drives: Analysis, Control and Modeling using Simulink .- MNPRESS, 2001.
282. Novotank R.T., Chiasson J., Bodson M. High-performance motion control of an induction motor with magnetic saturation // IEEE Trans. Control System Technology, 1999, Vol.7, No.3. – P.315-327.
283. Nubuki M. Norihiko A. et al. High precision torque control of reluctance motor / Conference record IEEE industrial application. – New York, 1989.- P.390-397.
284. Peterson B. Oscillation in inverter fed induction motor drives: Teck. Lic. Dissertation. – Sweden, Lund, 1991. – 67 p.
285. Pollock C., Williams B. Power converter circuits for switched reluctance motors with the minimum number of switches // IEEE Proceedings on Electrical Power Application, 1991, Vol. 137, No. 6, P.1034-1047.
286. Rasmussen P.O. Design and advanced control of switched reluctance motors: Ph.D. Thesis.– Denmark, 2002. – 256 p.
287. Rolim L.G. Suemitsu W.I. Development of an improved switched reluctance motor drive using a soft-switching converter // IEEE Proceedings on Electrical Power Application, 1999, Vol.146, No.5. – P.488-494.
288. Sahoo N.C. Xu J.X. at al. Determination of current waveforms for torque ripple minimization in switched reluctance motors using iterative an investigation // IEEE Proceedings on Electrical Power Application, 1999, Vol.146, No.4.- P.369-377.

289. Sakis Meliopoulos A.P., Gao W., Cokkinides G. J. Visualization and Animation of Inverter-Driven Induction Motor Operation // Proceedings of the 35th Hawaii International Conference on System Sciences, 2002.
290. Staton D., Boglietti A., Cavagnino A. Solving the more difficult aspects of electric motor thermal analysis in small and medium size industrial motors // IEEE Trans. Energy Conversion, 2005, Vol.20, No.3. – P.620-628.
291. Takahashi, T. Noguchi A new quick response and high efficiency control strategy of an induction motor // IEEE Trans. Ind. Appl., 1986, Vol. IA-22, No.5. – P.820-827.
292. WEG Technical guide - Induction motors fed by PWM frequency inverters. WEG, 2009. – 35 p.
293. Zakharov A.V. Kobelev A.S., Makarov L.N. Four-level optimization model of induction motors // 13th International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components. – Alushta, Crimea, Ukraine, 2010. – P.61-62.
294. Zakharov A.V. Kobelev A.S., Kruglikov O.V., Makarov L.N., Rodionov R.V. Experience of calculation of low-speed high moment induction motors // 13th International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components. – Alushta, Crimea, Ukraine, 2010. – P.62-63.
295. Yamamura S. Analysis of transient phenomena and field acceleration control of induction motors as AC servomotor of quick response // Ibid, 1983, Vol.103, No.7, P.491-497.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- АЭД – асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором.
- ВИД – вентильно-индукторный двигатель.
- ВОВ – высота оси вращения (габарит электродвигателя).
- ДПР – датчик положения ротора.
- ЖКХ – жилищно-коммунальное хозяйство.
- ИМ – индукторная машина.
- ИЭЭ – источник электропитания.
- КВШ – канатоведущий шкив.
- КД – конструкторская документация.
- МП – механическая передача.
- МЭК – международная электротехническая комиссия (*IEC*)
- Н – нагрузка.
- НИР – научно-исследовательская работа.
- ОКР – опытно-конструкторская работа.
- ОС – обратная связь.
- ПВ – продолжительность включения.
- ПИ – пропорционально-интегральный (регулятор).
- ПИД – пропорционально-интегральный дифференцирующий (регулятор).
- ДУП – датчик угловых перемещений (датчик частоты вращения) или преобразователь угловой координаты ротора в частоту вращения.
- ПСИ – приемо-сдаточные испытания.
- ПЧ – преобразователь частоты.
- САУ – система автоматического управления.
- СП – силовой преобразователь (электронный): СП(В) – выпрямитель; СП(И) – инвертор.
- СУ – система управления.
- ТТ – технические требования;
- ТЗ – техническое задание;

ТУ – технические условия;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция: *PWM* – классическая ШИМ;

SWM – пространственно векторная ШИМ.

ЭМП – электромеханический преобразователь.

DRFO (direct rotor field orientation) – векторное управление частотой вращения асинхронного двигателя с прямой ориентацией по полю ротора.

DTC (direct torque control) – прямое управление моментом асинхронного двигателя.

IRFO (indirect rotor field orientation) – векторное управление частотой вращения асинхронного двигателя с косвенной ориентацией по полю ротора.

Y – соединение фазных обмоток электродвигателя в звезду.

Δ – соединение фазных обмоток электродвигателя в треугольник.

Обозначение электродвигателей в работе:

1	2	3	4	5	6	7
5	AM		315	M	A	6

№ поля	Расшифровка условного обозначения
1	5 – номер серии асинхронных двигателей (4, 5, 6, 7)
2	AM – название серии: A, AM, AVER общепромышленные асинхронные двигатели; АДЧР, АЧ, AF, частотно-регулируемые асинхронные электродвигатели; ТАД – специальные асинхронные частотно-регулируемые двигатели для гибридного и электротранспорта, FMTK – специальные, асинхронные, краново-металлургические электродвигатели; ВИД – вентильно-индукторные двигатели; ВД – синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов.
3	Модификации: a, b, c - по типу сердечников ротора и статора; F, H - по классу нагревостойкости изоляции. (позиция может отсутствовать)
4	80, 90, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315 - высота оси вращения в мм
5	S, M, L - установочный размер по длине
6	A, B -длина сердечника статора (позиция может отсутствовать)
7	2, 4, 6, 8, 10, 12 - число полюсов $2p$

Примечание: В работе используется сокращенное обозначение электродвигателей, в котором отсутствует информация о монтажном и климатическом исполнении, классе энергоэффективности и др.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Общий вид таблиц базы данных для энергетического расчета
мехатронных систем, построенных на основе данных электродвигателей
серии 5А(М) (АИР(М))

A	B	E	F	G	H	I	P	Q	R	S	AG	AH	AI	AK	AL	AN	AO	AP	AT	BA	BD	BE	BF	BG	CD	CE	CF	CG	CH	CJ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17														

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
2	шланг	серпек	2p	Da1	Di1	z1	b11	b12	h1	ef	m1	alfa_S	tau	ti	hk1	ba11	ba12	ba1	tau1_d	sum_b1					
3	Ш-2644	БАКИ 757221.001	2	296	154,7	36	7,1	11,8	28,5	1	3,7	15	243,00	13,50	0,46	6,65	6,50	6,58	118,39	236,77					
4	Ш-2636	БАКИ 757221.001-01	4	296	189,7	48	7,2	10,2	27,5	1	3,5	15	148,99	12,42	0,50	5,41	5,68	5,55	66,58	266,31					
5	Ш-2641	БАКИ 757221.001-02	6	296	209,7	72	5,2	7,4	26	1	3,2	15	109,80	9,15	0,27	4,06	3,93	4,00	47,95	287,72					
6	Ш-2641	БАКИ 757221.001-02	8	296	209,7	72	5,2	7,4	26	1	3,2	15	82,35	9,15	0,27	4,06	3,93	4,00	35,96	287,72					
7																									
8		БАКИ 757221.490	2	295	188	36	11,2	8,7	22,1	1	3,5	25	283,89	14,66	1,80	3,95	9,64	6,80	122,33	244,66					
9		БАКИ 757221.482	4	295	189,7	36	10,6	7,55	24,7	1	3,2	25	148,99	16,55	1,73	6,43	13,14	9,79	88,07	352,28					
10		БАКИ 757221.491	6	295	209,7	72	7,05	5,2	26,2	1	3,2	15	109,80	9,15	0,52	2,23	6,15	4,19	50,29	301,72					
11		БАКИ 757221.491	8	295	209,7	72	7,05	5,2	26,2	1	3,2	15	82,35	9,15	0,52	2,23	6,15	4,19	37,72	301,72					
12																									
27																									
28																									
29		серпек	2p	Di1	delta*	Da2	z2	h20	b20	m20	e20	n2	b21	b22	n2	e2	m2	alfa_R	hk3	ba21	ba22	ba2	tau2_d	sum_b2	
30	Ш-2867	БАКИ 757211.001	2	154,7	1,1	152,5	28	8,55	7,6		0,7		6,2	2,5	19,9	2,8	2	28	17,11	1,12	8,11	8,23	8,17	114,37	228,75
31	Ш-2866	БАКИ 757211.002-01	4	189,7	0,7	188,3	40				0,7		7,3	2,2	37,85		1,5		14,79	3,57	6,93	6,64	6,79	67,86	271,43
32	шгт	БАКИ 757211.002-02	6	209,7	0,55	208,6	56						6,1	2,3	34				11,70	3,05	5,26	5,59	5,42	50,62	303,74
33	Ш-2645	БАКИ 757211.002-03	8	209,7	0,55	208,6	68						5,1	2,3	34				9,64	2,55	4,30	4,20	4,25	36,11	288,91
34	Ш-2838	БАКИ 757211.002-04	4	189,7	0,7	188,3	38						7,3	2,2	37,85	0,7	1,5		15,57	3,57	7,56	7,11	7,34	69,68	278,73
35	Ш-2838	БАКИ 757211.002-05	6	209,7	0,55	208,6	58	9,95		5	0,7		3,8	1,7	19	6	2	29	11,30	0,50	5,72	6,46	6,09	53,87	353,21
36	Ш-2796	БАКИ 757211.002-06	4	189,7	0,7	188,3	40				0,7		6,3	4,2	20,85		1,5		14,79	3,06	8,01	7,31	7,66	76,61	306,45
37	Ш-2822	БАКИ 757211.002-07	6	209,7	0,55	208,6	56						6,1	4,8	17,05	0,45	1,5		11,70	2,98	5,22	4,99	5,10	47,65	285,87
38	Ш-2794	БАКИ 757211.002-08	8	209,7	0,55	208,6	68						5,1	3,6	15,25	0,75	1,5		9,64	2,44	4,24	4,73	4,49	38,13	305,01
39	Ш-2886	БАКИ 757211.002-09	2	154,7	1,1	152,5	28	7,75	7,5				6,2	2,5	21,2	4	2	25	17,11	0,98	8,05	8,11	8,08	113,18	226,35
40	Ш-2884	БАКИ 757211.002-10	4	189,7	0,7	188,3	40	9,85	7		0,7		5,3	2	28	6	2	31	14,79	0,99	6,84	6,84	6,84	68,44	273,74
41																									
42		БАКИ 757211.481	2	168	0,85	166,3	28	4,81	4,5				7,1	3,4	29,29	7,86	2,2		18,66	3,38	7,96	7,61	7,78	108,98	217,91
43		БАКИ 757211.473	4	189,7	0,5	188,7	28	6,61	6,5				6,6	2,4	27,34	4,43	2,7		21,17	3,01	11,42	11,15	11,29	79,0048	316,018
44		БАКИ 757211.422	6	209,7	0,5	208,7	58						6,1	2,6	36	0,85	1,5	25	11,30	1,07	5,00	4,80	4,90	47,3689	284,213
45			8	209,7	0,5	208,7	58						6,1	2,6	36	0,85	1,5	25	11,30	1,07	5,00	4,80	4,90	35,5267	284,213
46																									
47																									
48																									

Рис. ПЗ.2. Общий вид таблиц базы данных штампов для электродвигателей с ВОВ 180мм

3	А	В	С	Д	Е	Ф	Г	Н	И	Ј	К	Л	М	Н	О	Р	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	АА	АВ	АС	АD	АЕ	АF	АG	АH	АI					
4	Общие показатели										Тип лаза статора										Средний статор										Тип ротора и формы п									
	h	б	U	р	м	IS	IR	кpd	cosφ	TO1	KO1	DO1	XM	Dat	Dit	Lt	z1	hct	bct	hct	bct	х.к.т	б.к.т	б.т	h	h1	Nf1	h1f	Nf1	h1f	h1f	N	х.д.т	B	TO2	KO2	АH	АI		
80	2,2	220	50	1	3	95	100	0,842	0,87	0	0	0	0	131	73	100	24	12,6	0,8	3	15	6,2	8,9	1	4	2	10	0,97	0,1	0	0	0	0	1	1	1	1	1		
100	4	220	50	1	3	95	100	0,87	0,88	0	1	0	0	0	168	89	105	24	19	0,5	3,5	3	7,7	11,7	1	6	2	10	0,97	0,1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	
100	5,5	220	50	1	3	95	100	0,87	0,88	0	1	0	0	0	168	89	140	24	19	0,5	3,5	3	7,7	11,7	1	6	2	10	0,97	0,1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	
112	7,5	220	50	1	3	95	100	0,899	0,89	0	0	0	0	191	108	130	36	17,3	0,5	3,5	30	5,9	8,7	1	6	3,5	6,8	0,97	0,1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	
132	11	220	50	1	3	95	100	0,88	0,9	0	0	0	0	172	120	130	36	17,7	0,5	3,5	30	5,9	8,7	1	6	3,5	8	0,97	0,1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	
160	18,5	220	50	1	3	110	100	0,89	0,89	0	0	0	0	1	260	140	145	36	16	1	3,5	45	7,6	11,6	1	8	3,5	20	0,97	0,2	1	1	1	1	1	1	1	1		
160	18,5	220	50	1	3	110	100	0,89	0,89	0	0	0	0	1	260	140	145	36	16	1	3,5	45	7,6	11,6	1	8	3,5	20	0,97	0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
180	22	220	50	1	3	110	100	0,89	0,91	0	0	0	0	1	295	154,5	120	36	28,5	1	3,7	15	7,1	11,8	1	8	3,5	20	0,97	0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
180	30	220	50	1	3	110	100	0,89	0,91	0	0	0	0	1	295	154,5	160	36	28,5	1	3,7	15	7,1	11,8	1	8	3,5	20	0,97	0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
200	37	220	50	1	3	110	100	0,926	0,93	0	0	0	0	1	327	177,5	180	36	31,65	1,15	4,2	45	8,8	14	1	8	3,5	20	0,97	0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
200	45	220	50	1	3	110	100	0,926	0,93	0	0	0	0	1	327	177,5	210	36	31,65	1,15	4,2	45	8,8	14	1	8	3,5	20	0,97	0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
225	55	220	50	1	3	110	100	0,926	0,93	0	0	0	0	1	368	194,5	205	36	30,15	1,15	4,3	45	9,8	14,7	1	8	3,5	20	0,97	0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
250	75	220	50	1	3	110	120	0,93	0,91	0	0	0	0	1	437	232	200	48	37,65	0,85	4	45	9,4	14	1	12	3,5	20	0,97	0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
250	90	220	50	1	3	110	120	0,93	0,91	0	0	0	0	1	437	232	200	48	37,65	0,85	4	45	9,4	14	1	12	3,5	20	0,97	0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
280	110	380	50	1	3	110	120	0,93	0,93	0	0	0	0	1	490	265	200	48	40,5	1	4	45	10,6	15,3	1	12	3,5	20	0,97	0,3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
280	110	380	50	1	3	110	120	0,93	0,93	0	0	0	0	1	490	265	200	48	40,5	1	4	45	10,6	15,3	1	12	3,5	20	0,97	0,3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
315	160	380	50	1	3	110	120	0,93	0,93	0	0	0	0	1	490	265	270	48	40,5	1	4	45	10,6	15,3	1	12	3,5	20	0,97	0,3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
315	160	380	50	1	3	110	120	0,93	0,93	0	0	0	0	1	530	288	270	48	46	1	4	45	11,2	16,6	1	16	3,5	20	0,97	0,3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
315	200	380	50	1	3	110	120	0,93	0,93	0	0	0	0	1	530	288	340	48	46	1	4	45	11,2	16,6	1	16	3,5	20	0,97	0,3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
315	250	380	50	1	3	120	140	0,93	0,93	0	0	0	0	1	530	288	400	48	46	1	4	45	11,2	16,6	1	16	3,5	20	0,97	0,3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
80	1,5	220	50	2	3	95	110	0,78	0,82	0	0	0	0	0	131	88	76	36	11,7	0,8	2,5	15	4,4	5,1	1	6	2,5	10	0,97	0,1	0	0	0	0	1	1	1	1		
100	1,5	220	50	2	3	95	110	0,8	0,82	0	0	0	0	0	168	104	96	36	17,6	0,5	3	3	5,2	7,8	1	6	2,5	10	0,97	0,1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	
100	4	220	50	2	3	95	110	0,8	0,85	0	0	0	0	0	168	104	100	36	17,6	0,5	3	3	5,2	7,8	1	6	2,5	10	0,97	0,1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	
112	5,5	220	50	2	3	95	110	0,874	0,85	0	0	0	0	0	191	120	130	36	18	0,5	3,5	30	5,6	8,5	1	6	3,5	10	0,97	0,1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	
132	7,5	220	50	2	3	95	110	0,874	0,85	0	0	0	0	0	225	140	115	36	20,9	0,5	3,5	30	5,6	8,5	1	6	3,5	10	0,97	0,1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	
160	15	220	50	2	3	95	110	0,9	0,85	0	0	0	0	0	260	163	150	48	25,8	1	3,2	45	6	9,1	1	8	3,5	20	0,97	0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
160	15	220	50	2	3	95	110	0,9	0,85	0	0	0	0	0	260	163	150	48	25,8	1	3,2	45	6	9,1	1	8	3,5	20	0,97	0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
180	32	220	50	2	3	110	120	0,9	0,87	0	0	0	0	0	295	189,5	200	48	27,5	1	3,5	15	7,2	10,2	1	8	3,5	20	0,97	0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
180	32	220	50	2	3	110	120	0,9	0,87	0	0	0	0	0	295	189,5	200	48	27,5	1	3,5	15	7,2	10,2	1	8	3,5	20	0,97	0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
200	37	220	50	2	3	110	120	0,92	0,88	0	0	0	0	0	327	207,5	195	48	29,15	1,15	4	45	7,1	10,7	1	8	3,5	20	0,97	0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
200	45	220	50	2	3	110	120	0,92	0,88	0	0	0	0	0	327	207,5	250	48	29,15	1,15	4	45	7,1	10,7	1	8	3,5	20	0,97	0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
225	55	220	50	2	3	110	120	0,932	0,86	0	0	0	0	0	368	234,5	225	48	33,15	1,15	4,2	45	8,2	12,4	1	12	3,5	20	0,97	0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
250	75	220	50	2	3	110	110	0,94	0,88	0	0	0	0	0	437	290	220	60	36,45	0,85	3,7	45	8,5	12	1	12	3,5	20	0,97	0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
250	90	220	50	2	3	110	110	0,94	0,88	0	0	0	0	0	437	290	260	60	36,45	0,85	3,7	45	8,5	12	1	12	3,5	20	0,97	0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
300	180	380	50	2	3	110	110	0,96	0,87	0	0	0	0	0	490	315	260	60	47	1	4	45	9,5	14	1	12	3,5	20	0,97	0,3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
315	160	380	50	2	3	110	110	0,96	0,89	0	0	0	0	0	1	530	340	315	60	53	1	4	45	10,6	15,7	1	16	3,5	20	0,97										

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Акты и справки о внедрении результатов работы

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «РУСЭЛПРОМ-
Мехатроника» филиал г.Владимир
М.В. Лазарев
«20.01.2012»



АКТ

внедрения результатов научно-исследовательских работ

Мы ниже подписавшиеся удостоверяем, что в период с 2005 по 2012 гг. канд. техн. наук Захаров Алексей Вадимович, проводил научно-технические работы по заказу ООО «РУСЭЛПРОМ-Мехатроника» ранее именовавшегося ООО «ВЭМЗ-Спектр», в результате которых были:

1. Разработаны прикладные программы:
 - 1.1 программа моделирования динамических электромеханических характеристик асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.
 - 1.2 программа расчета предельных нагрузочных частотных характеристик асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором используемых в частотно-регулируемом электроприводе.
2. На основании использования вышеупомянутых программных продуктов нами совместно с автором были решены следующие научно-технические задачи:
 - 2.1 определены причины нестабильной работы - колебаний электромагнитного момента асинхронных двигателей производства ОАО «ВЭМЗ» с ВОВ 112-315мм при работе на низкой частоте питания представлявшие серьезную проблему для нашей организации, найдены способы их исключения.
 - 2.2 проведен ряд численных экспериментов для решения прикладных задач использования электродвигателей с помощью имитационного моделирования асинхронных электроприводов с частным регулированием.
 - 2.3 найдены предельные нагрузочные частотные характеристики электродвигателей АДЧР с ВОВ 112-315мм производства ООО «РУСЭЛПРОМ-Мехатроника» имеющие первостепенное значение при определении возможности использования конкретного асинхронного электродвигателя в интересующей технической задаче.
3. Разработан ряд специальных частотно-регулируемых электродвигателей, в том числе, крановых, электродвигателей бурового станка.

Эффективность использования научных результатов определяется снижением количества энергетически затратных экспериментальных исследований необходимых для принятия решения о возможности применения разработанного электродвигателя в конкретном техническом приложении. Адекватность разработанных научных результатов подтверждается практикой.

Инженер отдела развития
ООО «РУСЭЛПРОМ-Мехатроника»

Директор по развитию
ООО «РУСЭЛПРОМ-Мехатроника»

 /Пирогов А.В./

 /Колосов А.Л./

УТВЕРЖДАЮ
Зам. управляющего директора
по развитию ООО «ПК «ВЭМЗ»
Лобашов В.В. 
«04» 02. 2013

АКТ

об использовании результатов научно-исследовательской работы

В период с 2010 г. по 2012 г. ООО «ПК «Владимирский электромоторный завод» выполняло разработку ТУ на электродвигатели «Стандарт+» серии 7AVE предназначенных для работы от сети и в составе частотно-регулируемого привода с высотами оси вращения 132-315 мм, $2p=2,4,6,8,12$, частотой питания 50Гц, серийно производимых на ООО «ПК «ВЭМЗ» с 2012г. При выполнении работы использованы научные положения, методики и программы, полученные в докторской диссертации к.т.н. А.В. Захарова, а именно:

- методика расчета предельных механических характеристик частотно-регулируемых электродвигателей;
- методика расчета максимального приведенного момента инерции электродвигателей.

Использование указанных методик при разработке нормативных документов позволило обеспечить повышение эффективности эксплуатации указанных электродвигателей в составе мехатронных систем и промышленных приводов за счет сохранения величины номинального момента при работе на пониженной частоте питания до 30 Гц, на электродвигателях с показателем энергоэффективности IE1, и до 20 Гц, на двигателях с IE2. Это соответствует увеличению статической нагрузки, от ранее принятой (линейной), на 40% и 60% соответственно. Кроме того, максимальное значение частоты питания при сохранении мощности увеличено с 60Гц (ГОСТ Р 52776-2007) до 70Гц и до 80 Гц на электродвигателях IE1 и IE2 соответственно. Вышесказанное позволяет привести характеристики электродвигателей «Стандарт+» в соответствие с ГОСТ Р МЭК/ТС 60034-17-2009.

Учет фактических пусковых свойств используемый в предложенной методике расчета максимального приведенного момента инерции позволил увеличить максимальные динамические нагрузки от 4 до 10 раз, по сравнению с рекомендациями ГОСТ Р 51689-2000.

За период с 06.2012 по 12.2012 серийное производство двигателей «Стандарт+» с ВОВ 160мм составило 58 шт. в год.

Эффективность использования научных результатов определяется повышением технических и эксплуатационных характеристик, надежности и срока службы электродвигателей, а также сокращением сроков проектных и испытательных работ на ВЭМЗ.

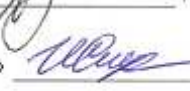
Разработанные методики и программы рекомендуются для использования на предприятиях электромашиностроения.

Справку подготовили:

Главный конструктор ООО «ПК «ВЭМЗ»

 /С.В. Петров/

Специалист по маркетингу ООО «ТД «Русэлпром»

 /И.С. Сижанов /



АКТ

об использовании результатов научно-исследовательской работы

ОАО «Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения» (ОАО «НИПТИЭМ»). В период с 2005 по 2013 гг. внедрил в промышленное использование программные комплексы, разработанные единолично соискателем ученой степени доктора технических наук к.т.н. ЗАХАРОВЫМ Алексеем Вадимовичем, по оригинальным математическим моделям и методикам автора:

1. «Программа моделирования электромеханических свойств асинхронных электродвигателей в динамических режимах работы», коммерческое название AED_TA версиях 1.0- 2.0.

2. «Программа моделирования электромеханических свойств вентильно-индукторных электродвигателей».

3. «Программа расчета предельных механических характеристик», коммерческое название AED_TEP в версиях 1.0-5.0.

Указанные программные продукты, разработанные в период 2004 - 2011 гг., в соответствии с правом на продажу ОАО «НИПТИЭМ», были поставлены на электромашиностроительные предприятия концерна «Русэлпром» в период с 2006г. по 2011г. в количестве 4 шт., а их аннотация включается в технический каталог ОАО «НИПТИЭМ» с 2009г.

Разработанные к.т.н. Захаровым методики моделирования и расчета и реализованные на их основе программные продукты были использованы в проектах:

1. «Создание методологии проектирования и разработка электромагнитного ядра асинхронных электродвигателей габаритов 112 – 315 мм для частотно-регулируемого привода широкого применения».

2. «Разработка двухфазных вентильно-индукторных электродвигателей для ЖКХ»;

3. «Разработка экспериментального образца комплекта тягового-силового электрооборудования машины гусеничной шифр «Викинг-2».

4. «Создание безредукторных приводов для лифтов грузоподъемностью до 1000кг», госконтракт №8/3-686 Н-09.

Работанные к.т.н. А.В. Захаровым методики и программы использованы при разработке ТУ на частотно-регулируемые электродвигатели АДЧР с ВОВ 112-315 2р=2-10 производимых ОАО «НИПТИЭМ» с 2012г (№ТУ16-13 на АДЧР 56-315).

Разработанные математические модели методики и программы соответствуют мировому уровню развития электротехники, электромеханики, мехатроники и рекомендуются для использования на предприятиях электромашиностроения.

Справку подготовили:

Главный научный сотрудник, секретарь НТС

канд. техн. наук _____

/Я.Б. Тубис/

Начальник расчетно-теоретического сектора,

канд. техн. наук _____

/ А.С. Кобелев/



СПРАВКА

об использовании результатов научно-исследовательской работы

В период с 2005 по 2013гг. ОАО «Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения» (ОАО «НИПТИЭМ») проводил научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы с использованием новых научных подходов, методов и результатов, полученных в докторской диссертации кандидата технических наук ЗАХАРОВА Алексея Вадимовича, а именно:

1. Концепция проектирования, основанная на тактике постепенных модификаций электрической машины, и алгоритмы по ее реализации.
2. Оригинальные методики расчета электромеханических свойств и характеристик электродвигателей переменного тока (асинхронных и вентильно-индукторных двигателей).
3. База данных, содержащая обобщенные результаты испытаний общепромышленных электродвигателей серий 5А(АИР), 5АН, 7АВЕ, а также методы и алгоритмы, необходимые для экспертных оценок важных электромеханических параметров частотно-регулируемых и специальных электродвигателей, построенные на основе этой базы данных.
4. Оригинальные программы и методики исследовательских, типовых и приемо-сдаточных испытаний электродвигателей переменного тока.
5. Подходы к оптимизации параметров питания частотно-регулируемых асинхронных и вентильно-индукторных электродвигателей, а также алгоритмы, реализующие эти подходы.
6. Методику учета влияния конструкции и материала оболочки электродвигателя на величину магнитных потерь.

Разработанные новые методы и алгоритмы были использованы при проведении НИР и ОКР по следующим темам:

1. Частотно-регулируемые крановые электродвигатели. Для которых было определено направление совершенствования активных частей серии частотно-регулируемых краново-металлургических асинхронных электродвигателей, разработан каталог, освоено более 9 типоразмеров, выпуск составил более 100шт.
2. Вентильно-индукторные двигатели для нужд ЖКХ: ВИД80-2Н, ВИД90-2Н. При разработке машин была использована оригинальная методика расчета и моделирования. Активные части 4-х типоразмеров ВИД были разработаны с использованием оригинального подхода к проектированию. Для освоения отрезка серии ВИД производством были разработаны новые методики и программы испытаний. Серийный выпуск двигателей составил 120 шт.
3. Безредукторный привод для лифтов с грузоподъемностью до 1000 кг (г.к. №8/3-686 Н-09). При проектировании более 14 типоразмеров электродвигателей для приводов лебедок были использованы новые алгоритмы расчета и анализа, позволившие оптимизировать режимы всей мехатронной системы. Корректировка поверочных электромагнитных расчетов в основных режимах работы проводилась на основе оригинальных методик. На окончание 2013 года серийный выпуск двигателей превысил 400 шт.
4. Электродвигатели АДВ 100/300кВт предназначенные для исследовательского винтового прибора ВП-107 ФГУП ЦАГИ. При проектировании был применен новый оригинальный подход к проектированию активных частей. Двигатели спроектированы с использованием новых технологий. Объем выпущенных машин составил 8шт.
5. Комплект электрических машин тягового электрооборудования для гибридного городского трамвая 12м, при проектировании активных частей которого был использован новый

подход и алгоритмы проектирования активных частей, а также оригинальные методы анализа электромеханических характеристик. Выпуск составил 2 комплекта.

6. Электрогенератор комплекта электрооборудования по техническому проекту «Платформа». При проектировании электрогенератора тягового электрооборудования были использованы новые подход к проектированию активной части и анализу электромеханических характеристик.

7. Рольганговые двигатели. При проектировании серии электродвигателей для рольгангов в модификациях, предназначенных для частотного регулирования и питания от сети, использованы статическая и динамическая тепловые модели, определена концепция и направление совершенствования, предложен проект каталога, изготовлены макетные образцы.

8. Частотно-регулируемые электродвигатели шарошечных станков СБШ 200, СБШ250 90кВт, 110кВт. Использован новый подход к проектированию, методика расчета предельных нагрузочных характеристик. Выпущено 4 шт.

9. Технический проект вентильно-индукторного электродвигателя для привода оси трамвая. Использована методика расчета и моделирования, динамическая тепловая модель.

10. Тяговый двигатель для вагона 81-760/761 метropоезда в г. Москве. Выявлена причина критического увеличения магнитных потерь, для чего использована методика расчета «аномального увеличения» магнитных потерь, предложены технические решения по снижению величины «аномальных» потерь, изготовлены макетные образцы, подтвердившие гипотезу автора.

11. Электродвигатели серии 7AVE «Стандарт+». Разработаны технические условия на электродвигатели на основе использования методики расчета предельных характеристик. Серийный выпуск - более 50шт в год.

12. «Разработка, изготовление и испытания экспериментального образца модуля асинхронизированного генератора, предназначенного для работы в составе лабораторной установки системы электродвижения», шифр «Мурена-АСГ». Использован оригинальный подход при проектировании системы.

Научный и технический уровень разработок соответствует мировым достижениям в области мехатроники, электромеханики и электромашиностроения.

Эффективность использования научных результатов и реализованных технических решений подтверждается повышением технического уровня новых мехатронных систем, реализованных в соответствии с вышеперечисленными проектами.

Справку подготовили:

Главный конструктор общепромышленных серий
и регулируемых двигателей

 /А.М. Зайцев/

Начальник КБ перспективных проектов,
разработок и исследований,
канд. техн. наук

 /С.А. Журавлев/



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «Центр СПРУТ-Т»

Кузьмин Б.В.

«3» 12 2013 г.

СПРАВКА

об использовании результатов научно-исследовательской работы

Настоящей справкой удостоверяется, что результаты научно-исследовательских работ, проведенных в ОАО «НИПТИЭМ» с участием вед. специалиста расчетно-теоретического сектора канд. техн. наук ЗАХАРОВА Алексея Вадимовича, а именно методика расчета увеличения магнитных потерь в сердечниках электрических машин за счет влияния конструкции и материала станины, внедрены компанией «СПРУТ-Технология» в программе поверочного электромагнитного расчета АЭДЗ-ЭМ в версии 2011.

Положительный эффект от внедрения методики расчета увеличения магнитных потерь характеризуется снижением погрешности вычислений магнитных потерь с 400% до 30% в случаях, когда индукция превышает 1.7 Тл, а происхождение указанного эффекта объясняется вытеснением магнитного поля из насыщенного ярма имеющего шихтовку в менее насыщенную станину не имеющую шихтовки.

Следует отметить, что программа поверочного электромагнитного расчета АЭДЗ-ЭМ промышленно используется на следующих электромашиностроительных предприятиях:

ОАО «НИПТИЭМ», г. Владимир; ОАО «СЭЗ», г. Сафоново; ОАО «УРАЛЭЛЕКТРО»; СКБ «УКРЭЛЕКТРОМАШ», г. Харьков, Украина; ОАО «Полесьеэлектромаш», г. Лунинец, Белоруссия.

Внедрение методики расчета увеличения магнитных потерь в сердечниках электрических машин за счет влияния конструкции и материала станины рекомендуется для использования при проектировании электродвигателей и электрогенераторов.

Справку подготовили:

Ведущий программист ООО «Центр СПРУТ-Т»

Кокорев А.А.

Ведущий программист ООО «Центр СПРУТ-Т»

Стисес А. Г.



Компания "Объединенная Энергия"
Joint Power Co., Ltd.



Т+Ф: +7 - (495) 544-46-47, 558-83-83 факс (495) 544-46-07
111672 г. Москва а/я 142 e-mail: jp@jpc.ru Http://www.jpc.ru

№ JP - 14 -275
28 марта 2014 г.



УТВЕРЖДАЮ
директор
ООО Компания «Объединенная
Энергия»
Н.А. Серебренников
2014 г.

**Акт
об использовании результатов научно-исследовательской работы**

В период с 2008 г. по 2014 г. ООО «Компания «Объединенная Энергия» проводило научно-исследовательские работы, направленные на поиск и реализацию перспективных решений модернизации приводных систем горного оборудования: буровых станков и экскаваторов при участии к.т.н. Захарова Алексея Вадимовича. При этом с использованием результатов, полученных в докторской диссертации А.В. Захарова, были выполнены следующие работы:

1. Рассчитаны и разработаны электродвигатели приводов шарошки 90 кВт, 110 кВт и хода 38 кВт для буровых станков СБШ-200 и СБШ-250. Технические решения соответствуют мировому уровню в области специального электромашиностроения.

2. Проведено рациональное разбиение серии асинхронных электродвигателей для экскаваторов ЭКГ-5, ЭКГ-12, ЭКГ-20 по габаритам и полюсностям. На основании расчетов определены главные размеры машин. Указанная работа выполнена в России впервые.

Полученные в результате выполнения работ решения по активным частям электродвигателей для буровых станков внедрены в производство в ОАО «НИПТИЭМ» специальных асинхронных двигателей, которые поставляются в ЗАО «УГМК-Рудгормаш», г. Воронеж.

Расчеты основных энергетических параметров экскаваторных электродвигателей использованы в ООО Компания «Объединенная Энергия» при составлении ТЗ на соответствующие электродвигатели.

Эффективность использования научных результатов и практических рекомендаций определяется повышением технического уровня горных машин - экскаваторов и буровых станков.

Главный инженер
ООО Компания «Объединенная Энергия»

О.Б. Басев

Главный конструктор
ООО Компания «Объединенная Энергия»

П.М. Афанасьев