

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Метельков Владимир Павлович

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТЕПЛООВОГО
СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И
ЭКСПЛУАТАЦИИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный консультант: доктор технических наук, доцент,
Зюзов Анатолий Михайлович

Официальные оппоненты: **Сарваров Анвар Сабулханович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск,
профессор кафедры «Автоматизированный
электропривод и мехатроника»;

Анучин Алексей Сергеевич,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
университет «МЭИ», г. Москва,
заведующий кафедрой «Автоматизированный
электропривод»;

Захаров Алексей Вадимович,
доктор технических наук,
ООО «Научно-исследовательский проектно-
конструкторский и технологический институт
электромашиностроения», г. Владимир,
начальник конструкторско-исследовательского
отдела.

Защита состоится «15» апреля 2020 г. в 14:15 на заседании диссертационного совета УрФУ 05.01.02 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»:

<https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=1016>

Автореферат разослан «__» февраля 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Болотин Кирилл Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Асинхронные двигатели (АД) – самый распространенный тип электродвигателей. По экспертным оценкам в Российской Федерации число таких двигателей составляет 230...270 млн. единиц. В том числе, не менее 50 млн. трехфазных АД напряжением 0,4 кВ. Ежегодный выход этих двигателей из строя составляет от 10...12 до 20...25%. В некоторых отраслях усредненный ресурс электродвигателей переменного тока намного меньше нормативного, так, в сельском хозяйстве он меньше в 2,5...3,5 раза.

Значительная доля выходов АД из строя связана с повреждением обмоток статора. В различных источниках приводятся разные цифры, характеризующие эту долю, доходящие до 68% для крановых приводов и даже до 80% для электроприводов в сельскохозяйственной отрасли. Отмечается, что большую роль в статистике отказов АД играют эксплуатационные причины, приводящие к перегреву обмоток. Это связано с тем, что долговечность изоляции статорной обмотки в значительной степени определяется тепловым режимом, что приводит к выводу о важности правильной оценки теплового состояния обмотки статора АД как в ходе эксплуатации, так и на этапе проектирования электропривода (ЭП), чтобы исключить в дальнейшем такие режимы эксплуатации, которые ведут к ускорению расхода ресурса изоляции обмоток и преждевременному выходу двигателя из строя. Следует отметить и другую сторону задачи правильного выбора двигателей при проектировании ЭП, в существенной степени определяющую его ресурсоэффективность. На большинстве работающих промышленных установок мощность электродвигателей завышена на 20...40%, что говорит о существовании резерва для сокращения затрат на создание ЭП и снижения потребления электроэнергии в ходе эксплуатации за счет более рационального выбора установленной мощности двигателей.

Таким образом, важной проблемой, тесно связанной с вопросами ресурсоэффективности ЭП, является проблема *оценки теплового состояния* АД (как на стадии проектирования ЭП, так и на стадии его эксплуатации) с точки зрения обеспечения отработки им нормативного срока службы. Здесь необходимо особо подчеркнуть тесную связь теплового состояния электродвигателя с режимами работы. Другие факторы, влияющие на надежность, в основном зависят либо от условий внешней среды (влажность, агрессивная среда, запыленность и т.д.), либо предопределены конструктивно (влияние ШИМ, несимметрии напряжения сети и т.д.).

Рисунок 1 иллюстрирует целый спектр взаимосвязанных вопросов, необходимость решения которых вытекает из проблемы *правильной оценки теплового состояния* двигателя на этапах конструирования ЭП и его эксплуатации. Так, возникает потребность в тепловых моделях электродвигателей, ориентированных на задачи электропривода. Для ЭП необходимы модели, описывающие не установившееся состояние, а процессы нагрева и охлаждения – термодинамические модели (ТДМ). Для ТДМ в задачах электропривода характерен широкий диапазон изменения температуры грею-

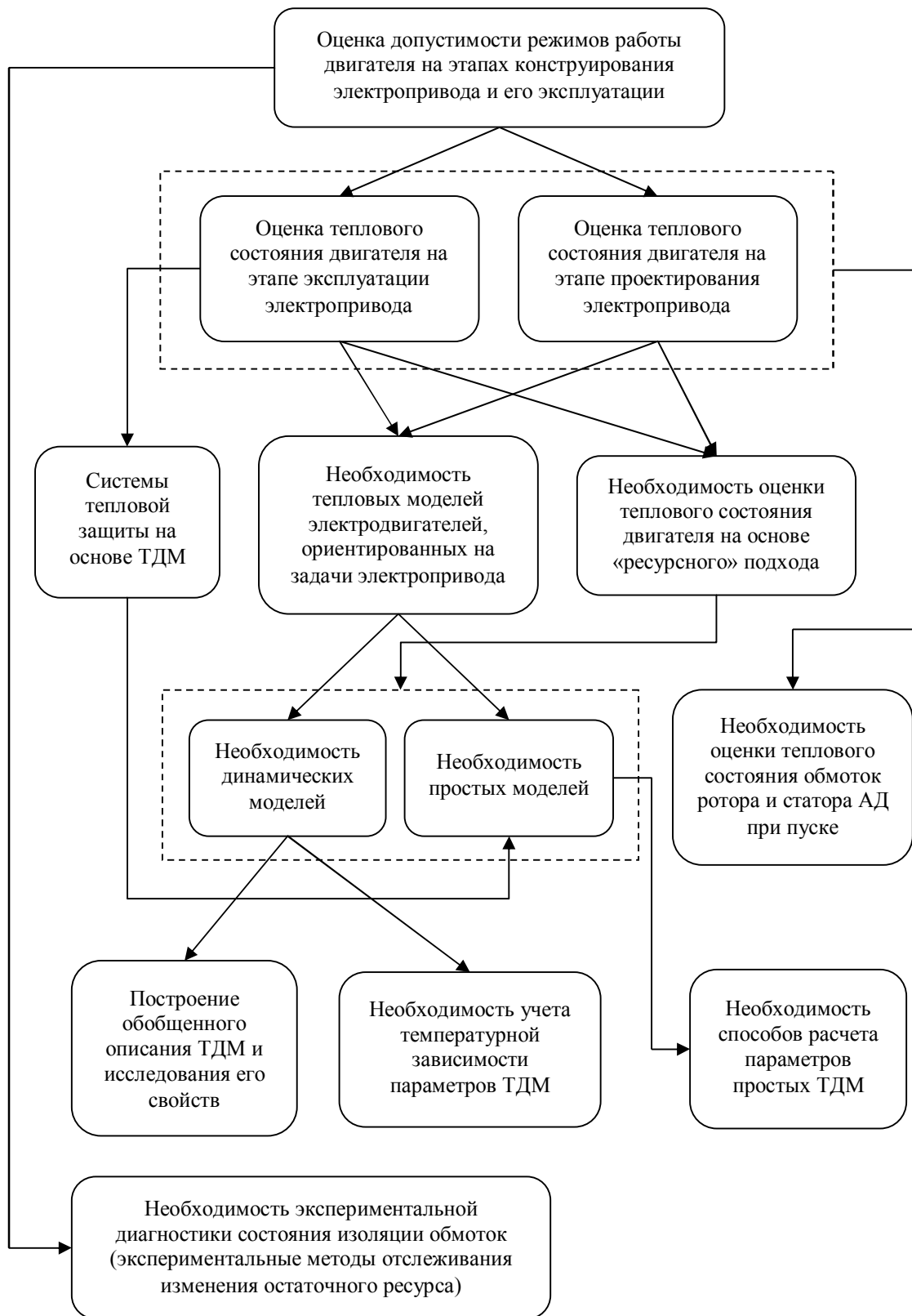


Рисунок 1 – Взаимосвязь вопросов, вытекающих из необходимости оценки допустимости режимов работы двигателя на этапах конструирования электропривода и его эксплуатации

щихся элементов, что вызывает, в ряде случаев, необходимость учета температурной зависимости параметров модели и изучение влияния этого фактора на ее свойства. *Вопрос о влиянии температурной зависимости*

параметров на свойства ТДМ в литературе практически не рассматривался. Отсюда возникает необходимость построения обобщенного описания ТДМ электродвигателя и исследования ее свойств. Вместе с тем, в задачах электропривода возникает необходимость также и в достаточно простых ТДМ, определение параметров которых можно было бы провести при ограниченном объеме информации о машине. *Способы расчета параметров даже весьма простой двухмассовой ТДМ АД в условиях ограниченной информации о машине практически отсутствуют.* Важными представляются также и аспекты, связанные с использованием ТДМ для построения систем тепловой защиты.

Для решения вопросов о допустимости пусковых режимов электропривода представляет интерес оценка теплового состояния АД в этих режимах, а также вопросы, связанные с выбором рациональной компоновки энергетического канала электропривода с этой точки зрения.

При оценке теплового состояния электродвигателя необходимо учитывать, что для изоляции его обмоток деструктивным фактором является не температура сама по себе, а процессы в изоляции, которые от нее зависят. Поэтому актуальной проблемой является разработка методов *оценки теплового состояния* машины с учетом влияния этих процессов на термический ресурс изоляции. Такие методы позволили бы получить более обоснованную оценку теплового состояния двигателя, а значит, обеспечить более высокую эффективность, чем прямые методы на основе усреднения температуры обмотки или классические косвенные методы средних потерь и эквивалентных величин. Вопросами, связанными с влиянием температуры на процессы в изоляции обмоток, в течение длительного времени занимались такие известные ученые, как Brancato E.L., Bussing W., Dakin T.W., Habetler T.G., Kaufhold M., Montanari G.C., Stone G.C. и многие другие. Тем не менее, в настоящее время *отсутствуют способы учета нелинейного характера связи скорости термического старения изоляции с температурой при использовании классических косвенных методов для оценки теплового состояния электродвигателя.*

Важным вопросом является проблема экспериментальной диагностики состояния изоляции обмоток, возможность осуществлять мониторинг изменения остаточного ресурса изоляции обмотки для принятия своевременных решений по дальнейшей эксплуатации машины или планирования ее обслуживания. Проблемой диагностики электрических машин и в целом электропривода занимались многие известные ученые, среди которых Бешта А.С., Гольдберг О.Д., Козярук А.Е., Котеленец Н.Ф., Лукьянов С.И., Мозгалевский А.В., Муравлев О.П., Новожилов А.Н., Осипов О.И., Петухов В.С., Сарваров А.С., Сташко В.И., Стрельбицкий Э.К., Таран В.П., Усынин Ю.С., Хомутов О.И., Хомутов С.О., Antonino-Daviu J., Bellini A., Bonnett A.H., Cardoso A.J.M., Dorrell D.G., Filippetti F., Habetler T.G., Nussbaumer P., Thomson W.T., Toliyat H.A. и др. Однако, задачи *разработки простых в реализации способов диагностики в настоящее время остаются актуальными.*

Поскольку реальные условия функционирования ЭП могут быть самые различные, а косвенные методы оценки теплового состояния (метод средних потерь и методы эквивалентных величин) не всегда дают адекватный результат,

актуальны и прямые методы оценки на основе вычисления температуры с использованием математического моделирования. Эти методы приобретают особую актуальность с учетом того, что и функционирование механической части ЭП может отличаться своими особенностями, которые часто затруднительно учесть аналитически и это также требует использования математических моделей. Таким образом, в настоящее время *актуальной задачей является построение и использование для оценки режимов работы ЭП комплексных моделей, включающих в себя как электродвигатель (с его ТДМ), так и преобразователь и механическую часть привода.*

Целью диссертационной работы является разработка методов и технических решений для эффективной оценки теплового состояния асинхронных двигателей на этапах проектирования и эксплуатации электропривода, направленных на повышение их надежности и долговечности, а также научно обоснованных решений для повышения ресурсоэффективности асинхронных электроприводов за счет рационального выбора их параметров на стадии проектирования.

Для достижения указанной цели в диссертации поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Получение обобщенного описания ТДМ АД для произвольного количества узлов и охлаждающих сред и его исследование с учетом специфики использования в задачах электропривода, в том числе с учетом влияния на свойства ТДМ температурной зависимости параметров при широком диапазоне изменения температуры элементов модели.

2. Обоснование рационального уровня детализации, а также структуры ТДМ АД для задач электропривода, связанных с оценкой теплового состояния двигателя на этапах проектирования электропривода и его функционирования.

3. Анализ математического описания взаимосвязей параметров двухмассовой ТДМ АД с учетом особенностей двигателей закрытого и защищенного исполнения, разработка методики расчета параметров модели. Оценка возможности использования экспериментальных данных при расчете параметров ТДМ АД и разработка методики их применения.

4. Разработка методики оценки теплового состояния АД на основе учета расхода термического ресурса изоляции для различных режимов работы электропривода на этапе его проектирования.

5. Разработка предложений по технической реализации решения проблемы мониторинга теплового состояния АД в ходе эксплуатации на основе построения различных вариантов систем защиты двигателя как с использованием ТДМ, так и с использованием средств измерения температуры.

6. Разработка предложений по технической реализации решения проблемы мониторинга расхода термического ресурса изоляции обмотки статора АД в ходе эксплуатации.

7. Разработка методики оценки теплового состояния АД в пусковых режимах и анализ на ее основе вопросов рационального согласования параметров электромеханического комплекса с учетом особенностей системы

электропривода, разработка программных средства для оценки теплового состояния АД в пусковых режимах.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Получено и исследовано обобщенное описание ТДМ АД с учетом специфики использования в задачах электропривода, отличающееся тем, что учитывает произвольное количество узлов и охлаждающих сред, а также обоснован рациональный уровень сложности (подробности) и структура ТДМ АД для задач электропривода.

2. Выполнен анализ математического описания взаимосвязей параметров двухмассовой ТДМ АД, получены аналитические соотношения для расчета параметров этой модели, отличающиеся тем, что для их использования требуется минимальный объем исходных данных, а также выполнен анализ возможностей и разработана методика использования экспериментальных данных при расчете параметров двухмассовой ТДМ АД.

3. Разработана методика оценки теплового состояния АД на этапе проектирования электропривода и в ходе его эксплуатации на основе вычисления расхода термического ресурса изоляции обмотки, отличающаяся тем, что позволяет учесть нелинейный характер зависимости между скоростью термического старения изоляции обмотки и ее температурой, что повышает ее эффективность.

4. Предложен принцип построения систем тепловой защиты АД на основе ТДМ с разделением быстрого и медленного каналов модели, отличающийся тем, что позволяет упростить решение проблемы определения начальных условий для ТДМ при возобновлении работы после отключения привода.

5. Предложен принцип построения системы мониторинга теплового состояния АД на основе усреднения скорости старения изоляции, отличающийся тем, что он обеспечивает более высокую эффективность оценки теплового состояния АД, чем системы, построенные на основе усреднения температуры, позволяя более адекватно учесть влияние колебаний температуры на скорость термического старения изоляции.

6. Предложен подход к мониторингу и прогнозированию состояния изоляции обмотки статора АД в ходе эксплуатации электропривода на основе использования информации об эффективном значении емкостных токов утечки, отличающийся тем, что позволяет экспериментальным путем получить данные, необходимые для оценки остаточного ресурса изоляции обмотки.

7. Получены аналитические выражения для оценки теплового состояния АД в пусковых режимах, отличающиеся тем, что они требуют сравнительно небольшого объема исходных данных и позволяют выполнить согласование параметров электромеханического комплекса с учетом особенностей системы электропривода.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Предложенные варианты ТДМ АД обеспечивают более простое параметрирование в условиях недостатка данных, а также упрощение решения проблемы начальных условий при определенной форме представления модели,

что позволяет упростить и расширить использование ТДМ для построения систем защиты и мониторинга теплового состояния АД.

2. Предложенный подход к эквивалентированию тепловых режимов по расходу термического ресурса изоляции дает возможность более адекватно оценивать тепловые режимы АД. Это, с одной стороны, позволяет избежать при проектировании электропривода неоправданного завышения мощности двигателя, обеспечивая тем самым повышение ресурсоэффективности электропривода, а с другой стороны, позволяет избежать выбора такого варианта, при котором происходило бы чрезмерно быстрое исчерпание термического ресурса изоляции обмоток, обеспечивая тем самым повышение надежности.

3. Предложенные варианты систем защиты и мониторинга теплового состояния электродвигателя дают возможность обеспечить более надежный контроль теплового состояния в ходе эксплуатации электропривода, позволяя снизить вероятность преждевременного выхода его из строя.

4. Предложенный подход к мониторингу и прогнозированию состояния изоляции обмотки электродвигателя на основе использования информации о емкостных токах утечки дает возможность осуществлять прогнозирование вероятного срока службы изоляции обмотки, что полезно как при организации обслуживания электропривода по состоянию, так и при реализации концепции проактивного диагностирования и обслуживания.

5. Предложенные методы оценки теплового состояния обмоток АД в пусковых режимах позволяют при проектировании электроприводов избежать таких вариантов компоновки электромеханических узлов электропривода, которые ведут к перегреву обмоток с сокращением сроков службы машины или к вынужденному сокращению межремонтных интервалов с соответствующим увеличением затрат. Полученные результаты также позволяют выявить возможности снижения термических перегрузок обмоток электродвигателя за счет управления пусковыми режимами.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе нашли применение положения теории электропривода, теории электрических машин, теории дифференциальных и интегральных уравнений, матричной алгебры, численные методы: методы численного интегрирования и дифференцирования, численные методы решения задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений, численные методы аппроксимации экспериментальных данных, метод наименьших квадратов, генетические алгоритмы, теория вероятностей и математической статистики, методы математического моделирования с привлечением современных компьютерных программных продуктов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обобщенное математическое описание термодинамической модели электрической машины для произвольного количества узлов и охлаждающих сред и результаты его анализа.

2. Математическое описание взаимосвязей параметров двухмассовой ТДМ АД, позволяющее аналитическим путем или численными методами определить значения этих параметров при различном составе исходных данных о двигателе.

3. Подход к эквивалентированию тепловых режимов и оценке теплового состояния электродвигателя, основанный на вычислении расхода термического ресурса изоляции и методика использования прямой оценки теплового состояния АД на основе вычисления расхода термического ресурса.

4. Методика применения косвенной оценки теплового состояния АД на этапе конструирования электропривода при использовании классических методов средних потерь и эквивалентных величин с учетом влияния колебаний температуры обмотки на термический ресурс изоляции.

5. Форма представления двухмассовой ТДМ АД (двухканальная ТДМ АД), требующая минимального объема информации для ее параметрирования, предназначенная для использования в системах тепловой защиты двигателя и алгоритмы работы системы тепловой защиты на основе такой ТДМ, позволяющие упростить решение проблемы определения начальных условий при возобновлении ее работы после отключения привода.

6. Система мониторинга теплового состояния АД на основе усреднения скорости старения изоляции с помощью скользящего окна и алгоритмы работы такой системы при использовании ТДМ и при использовании средств измерения температуры обмотки.

7. Система мониторинга теплового состояния АД на основе вычисления остаточного термического ресурса изоляции и алгоритмы работы такой системы как при использовании ТДМ, так и при использовании средств измерения температуры обмотки.

8. Подход к мониторингу и прогнозированию состояния изоляции обмотки электродвигателя на основе использования информации об эффективном значении емкостных токов утечки и алгоритм работы системы, реализующей этот подход, на основе идентификации параметров моделирующей кривой.

9. Аналитические соотношения, позволяющие оценить подъем температуры обмоток ротора и статора АД к концу пуска электропривода, а также решения, позволяющие снизить нагрев обмоток в пусковых режимах.

Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций определяется корректностью постановок задач, обоснованностью принятых допущений, строгими математическими доказательствами, использованием апробированных математических и численных методов, а также соответствием результатов расчетов, моделирования и натурального эксперимента. Полученные результаты подтверждаются представительным обсуждением на научных конференциях международного и отраслевого уровней.

Реализация результатов работы. Диссертационная работа выполнялась в ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» в рамках плановых госбюджетных научно-исследовательских работ: тема № 1803 «Разработка и исследование современных систем электропривода переменного тока с микропроцессорным управлением, оптимизированных по энергетическим показателям» и тема № 1843 «Разработка научных основ создания энергоэффективных электромеханических устройств и систем переменного тока с микропроцессорным управлением и программных средств для их исследования», а также в рамках договора № П975.210.008/16, ЗАО «РОБИТЕКС» по теме:

«Разработка микропроцессорной системы управления частотно-регулируемого электропривода» (п. 3.4. Разработка алгоритмов защиты двигателя от перегрева по току статора).

Результаты диссертационной работы использованы в производственной и научно-исследовательской деятельности ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы» (г. Екатеринбург), ЗАО «РОБИТЕКС» (г. Качканар, Свердловской обл.) при разработке электроприводов различного назначения.

Результаты диссертационной работы нашли применение в учебном процессе и отражены в учебных программах профилирующих дисциплин в ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Основное содержание диссертации соответствует Паспорту научных специальностей 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты, 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

Международные научно-технические конференции «Электроприводы переменного тока» ЭППТ-2012, ЭППТ-2015, ЭППТ-2018 (Екатеринбург, 2012, 2015, 2018 гг.); VI-IX Международные (XVII-XX Всероссийские) конференции по автоматизированному электроприводу (Тула, 2010, Иваново, 2012, Саранск, 2014, Пермь, 2016); Международная научно-техническая конференция «Электротехнические комплексы и системы» (Комсомольск-на-Амуре, 2010); Международная научно-практическая конференция в рамках выставки «Энергетика и электротехника – 2010» (Екатеринбург, 2010); Международная научно-практическая конференция «Современная наука: теория и практика» (Ставрополь, 2010); IV Международная научно-техническая конференция «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы» (Екатеринбург, 2011); Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения, Иваново, 2011); V Юбилейная международная научно-техническая конференция, посвященная памяти Г.А. Сипайлова (Томск, 2011); VI-IX Всероссийские (с международным участием) научно-технические интернет-конференции «Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике» (Пермь, 2012-2015 гг.); VI Международная научно-техническая конференция «Электромеханические преобразователи энергии» (Томск, 2013); Международная научно-практическая конференция «Инновационное развитие современной науки» (Уфа, 2014); Международная конференция «2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)» (Anacapri, Italy, 2016); Международная конференция «2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)» (Varna, Bulgaria, 2016); Международные конференции «International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)» (Челябинск, 2016, Санкт-Петербург, 2017).

Публикации. Результаты выполненного исследования опубликованы в 69 научных трудах, среди которых: 20 статей в журналах, входящих в перечень,

определенный ВАК, 11 публикаций, индексируемых в реферативной базе Scopus, 3 патента на полезные модели РФ, 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, 28 прочих публикаций.

Личный вклад. В диссертационной работе обобщены результаты, полученные лично автором или в соавторстве. Автор принимал непосредственное участие в постановке цели и задач исследования, в выборе методов исследования, разработке математических моделей, проведении экспериментальных и теоретических исследований, интерпретации и обобщении полученных результатов. В публикациях, выполненных в соавторстве, личный авторский вклад составляет не менее 50-75%.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка используемой литературы из 329 наименований. Объём диссертации составляет 437 страниц, включая 198 рисунков, 26 таблиц и приложения на 23 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель, поставлены задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость выполненных исследований, представлены сведения о реализации и апробации работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, а также дана общая характеристика диссертации.

В **первой главе** решается задача получения обобщенного описания ТДМ электрической машины и его исследования с учетом специфики использования в задачах электропривода. Специфика определяется: а) широким диапазоном изменения температуры узлов ТДМ, что влечет необходимость учета температурной зависимости параметров при моделировании; б) проблемами обеспечения точности и устойчивости решения с учетом большого коэффициента жесткости задачи при моделировании всей системы электропривода.

В работе получено математическое описание обобщенной ТДМ электрической машины для произвольного числа греющихся узлов и охлаждающих сред:

$$C \frac{d\theta}{dt} = \Delta P' + \Lambda \theta . \quad (1)$$

где $\Delta P'$ – матрица-столбец мощностей потерь в узлах модели размерностью $n \times 1$; θ – матрица-столбец температур узлов размерностью $n \times 1$; C – диагональная матрица теплоемкостей узлов размерностью $n \times n$; Λ – общая матрица тепловых проводимостей размерностью $n \times n$;

$$\Delta P' = \begin{bmatrix} \Delta P'_1 \\ \Delta P'_2 \\ \dots \\ \Delta P'_n \end{bmatrix}; \quad \theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dots \\ \theta_n \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & C_n \end{bmatrix}; \quad \Lambda = \begin{bmatrix} -\lambda_{11} & \lambda_{12} & \dots & \lambda_{1n} \\ \lambda_{21} & -\lambda_{22} & \dots & \lambda_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{n1} & \lambda_{n2} & \dots & -\lambda_{nn} \end{bmatrix}.$$

Для линейной или линеаризованной зависимости мощности потерь в l -ом источнике потерь i -го узла ТДМ:

$$\Delta P'_i = \sum_{l=1}^{s_i} \Delta P_{baz.i(l)} [1 - k_{\theta i(l)} \theta_{baz.i(l)}] + \sum_{k=1}^m \theta_{0k} \lambda_{i0k}; \quad (2)$$

$$\lambda_{ii} = \sum_{k=1}^m \lambda_{i0k} + \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^n \lambda_{ij} - \sum_{l=1}^{s_i} \Delta P_{baz.i(l)} k_{\theta i(l)}, \quad (3)$$

где $\Delta P_{baz.i(l)}$ – мощность потерь при некоторой фиксированной температуре $\theta_{baz.i(l)}$, относительно которой рассчитывается ее изменение; $k_{\theta i(l)}$ – температурный коэффициент для l -го источника потерь в i -ом узле, K^{-1} ; s_i – количество источников потерь в i -ом узле.

В соответствии с теоремой Гершгорина, каждое собственное число $\chi_{(A)}$ матрицы $A = C^{-1}\Lambda$ всегда расположено в области локализации, определяемой соотношением $|a_{ii} - \chi_{(A)}| \leq \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^n |a_{ij}|$, ($i=1, \dots, n$), которое можно переписать как

$$\left| \chi_{(A)} + \sum_{k=1}^m a_{i0k} + \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^n a_{ij} - C_i^{-1} \sum_{l=1}^{s_i} \Delta P_{baz.i(l)} k_{\theta i(l)} \right| \leq \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^n |a_{ij}|, \quad (4)$$

где $a_{ii} = C_i^{-1} \lambda_{ii}$; $a_{ij} = C_i^{-1} \lambda_{ij}$; $a_{i0k} = C_i^{-1} \lambda_{i0k}$.

Анализ неравенства (4) показывает, что при $\Delta P_{baz.i(l)} k_{\theta i(l)} \neq 0$ оно может выполняться как при отрицательных, так и при положительных значениях $\chi_{(A)}$ (включая и $\chi_{(A)} = 0$). В любом случае для этого должно выполняться неравенство

$$\chi_{(A)} \leq C_i^{-1} \left(\sum_{l=1}^{s_i} \Delta P_{baz.i(l)} k_{\theta i(l)} - \sum_{k=1}^m \lambda_{i0k} \right). \quad (5)$$

Из (5) следует, что при $\sum_{l=1}^{s_i} \Delta P_{baz.i(l)} k_{\theta i(l)} > \sum_{k=1}^m \lambda_{i0k}$ значение $\chi_{(A)}$ оказывается положительным, что соответствует ситуации неограниченного увеличения температуры i -го узла без выхода на установившийся уровень.

На рисунках 2 и 3 показаны графики превышения температуры (τ) лобовых частей обмотки статора двигателя 4A100L4 и ее второй производной ($\ddot{\tau}$) при разных величинах момента двигателя. Графики на рисунке 2 соответствуют ситуации, когда все собственные числа матрицы A отрицательны, а на рисунке 3 – ситуации, при которой одно из собственных чисел имеет положительное значение

и процесс нагрева двигателя приобретает характер своеобразного «саморазогрева», о чем свидетельствует переход графика второй производной в положительную область.

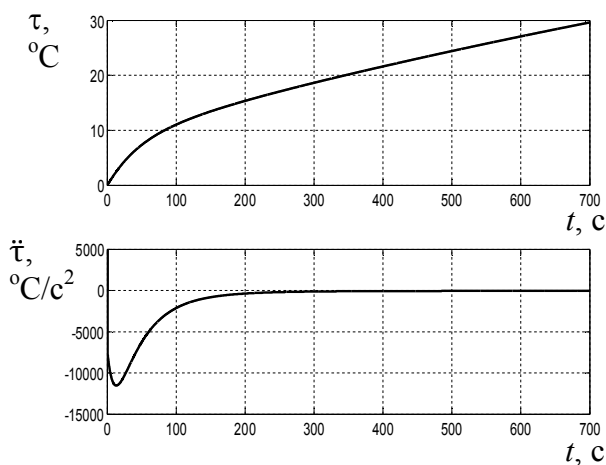


Рисунок 2 – Графики $\tau(t)$ и $\ddot{\tau}(t)$ при $M/M_N=1,0$

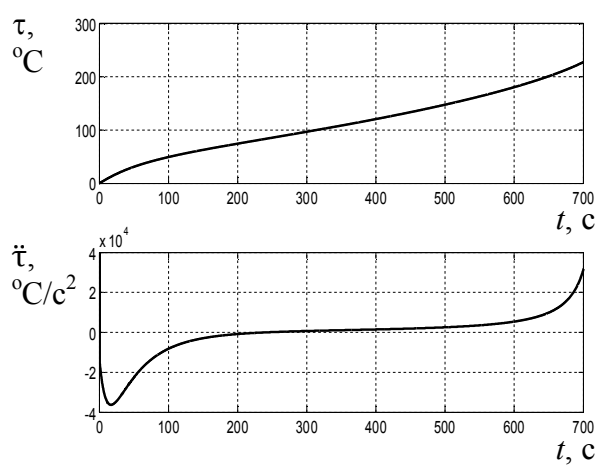


Рисунок 3 – Графики $\tau(t)$ и $\ddot{\tau}(t)$ при $M/M_N=2,0$

Проведен анализ влияния температурной зависимости теплоемкостей и тепловых проводимостей ТДМ электрической машины. На рисунке 4 видно, что в диапазоне температур, не превышающих значения, соответствующие номинальному режиму работы (θ_{Ni}), погрешность расчета из-за температурного изменения теплопроводностей не существенна и не превышает 3%. В то же время, надо иметь в виду, что игнорирование температурной зависимости теплопроводности может приводить к серьезным ошибкам расчета при температурах, существенно превышающих θ_{Ni} . Так, при расчете установившегося превышения температуры лобовых частей обмотки статора двигателя 4A100L4 при нагрузке в 140% номинального момента (M_N) с учетом температурного изменения теплопроводностей получаем 195,8°C, а без учета 240,7°C. Принимая во внимание экспоненциальный характер зависимости скорости термического старения изоляции обмотки от ее температуры, подобное расхождение следует считать не приемлемым для задач оценки теплового состояния двигателя.

Температурное изменение теплоемкостей и тепловых проводимостей модели приводит к изменению постоянных времени при изменении нагрузки. На рисунке 5 показаны графики отношения постоянных времени T_{0j}/T_j 6-массовой термодинамической модели двигателя 4A100L4 в функции относительной величины момента двигателя, где T_{0j} – постоянные времени без учета температурной зависимости теплоемкостей и теплопроводностей; T_j – постоянные времени с учетом температурной зависимости этих параметров; j – номер постоянных времени в порядке возрастания их величины. При расчете постоянных времени учитывался состав разных материалов в цепочках теплопроводностей.

На рисунке 5 видно, что в диапазоне температур, не превышающих значения θ_{Ni} , погрешность расчета постоянных времени не велика и только для первой и пятой постоянных приближается к 10%, при этом первая постоянная

связана с теплоемкостью внутреннего воздуха, имеет величину менее 1 с и не оказывает заметного влияния на динамику температуры обмоток. При расчетах процессов, в ходе которых температуры узлов модели существенно превышают значения θ_{Ni} , необходим учет влияния температуры на постоянные времени, так как при $\theta_i > \theta_{Ni}$ разница между T_j и T_{0j} оказывается существенной для трех наибольших постоянных. Две из них (четвертая и пятая) имеют величины, находящиеся в пределах формальной границы длительности повторно-кратковременного режима работы, поэтому компоненты решения, содержащие эти постоянные, могут существенно изменяться на интервалах соответствующей длительности, оказывая влияние на точность результатов моделирования.

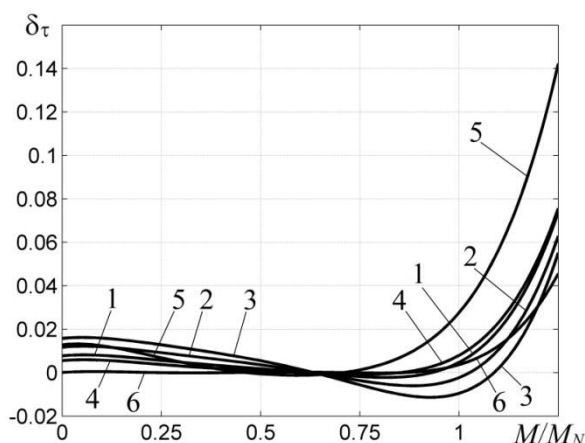


Рисунок 4 – Погрешности расчета установившегося превышения температур узлов термодинамической модели (1–лобовые части обмотки; 2–пазовая часть обмотки; 3–статор; 4–внут-ренний воздух; 5–ротор; 6–станина)

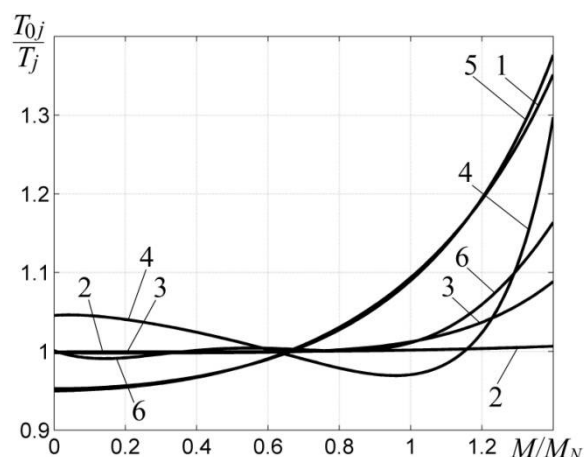


Рисунок 5 – Зависимости относительных значений постоянных времени ТДМ от нагрузки на валу (цифрами обозначены номера постоянных времени в порядке возрастания их величины)

Анализ обобщенной термодинамической модели показал, что число обусловленности матрицы системы ТДМ ($R_{cond}(A)$) может оказывать существенное влияние на требования к вычислительным ресурсам, определяя величину шага интегрирования. Показано, что это число обусловленности зависит от количества узлов ТДМ (см. таблицу 1) и может быть уменьшено за счет снижения размерности решаемой системы путем структурных преобразований (например, исключением узла внутреннего воздуха в АД).

Таблица 1 – Числа обусловленности матрицы A и отношения постоянных времени модели

Двигатель		4A100L4	4A225M4
6-массовая ТДМ с узлом внутреннего воздуха	$R_{cond}(A)$	16456	26266
	T_{max}/T_{min}	5959,1	10162
5-массовая ТДМ с исключенным узлом внутреннего воздуха	$R_{cond}(A)$	447,9	278,5
	T_{max}/T_{min}	165,4	111,8
2-массовая ТДМ	$R_{cond}(A)$	52,61	58,95
	T_{max}/T_{min}	28,61	33,07

Во **второй** главе решается задача обоснования рационального уровня подробности и структуры ТДМ АД для задач электропривода, анализа математического описания взаимосвязей параметров двухмассовой ТДМ АД и получения аналитических соотношений для расчета параметров этой модели.

Выполнен анализ наиболее часто встречающихся термодинамических схем АД, который позволяет сформулировать рекомендации относительно компоновки узлов для упрощенных ТДМ и обоснована целесообразность использования для оценки теплового состояния АД в задачах электропривода двухмассовой ТДМ с выделением в качестве отдельного узла обмотки статора. Это объясняется следующим. Для практического применения термодинамической модели АД необходимо определить ее параметры. Для расчета параметров сложной многомассовой ТДМ требуется очень подробная информация о конструктивных особенностях двигателя и используемых материалах, которая, как правило, доступна только специалистам, занимающимся проектированием электрических машин. Специалисты, работающие в области электропривода и сталкивающиеся с необходимостью использования таких ТДМ для проверки теплового состояния АД в ходе проектирования или эксплуатации электропривода, в большинстве случаев не имеют доступа к подробной информации, необходимой для расчета параметров сколько-нибудь сложной ТДМ. Это приводит к выводу о том, что для задач электропривода особое значение в практическом плане приобретает двухмассовая ТДМ АД с выделением обмотки статора в отдельный узел. Такая модель требует наименьшего объема информации для определения своих параметров (не считая одномассовой модели), но, в отличие от одномассовой ТДМ, позволяет значительно точнее воспроизводить динамику температуры наиболее критичных к нагреву частей АД. Этот вывод определяет необходимость и важность особого рассмотрения свойств двухмассовой ТДМ АД и способов определения ее параметров при ограниченном объеме информации о внутренних параметрах двигателя.

Вследствие относительной простоты двухмассовой ТДМ целесообразно рассматривать ее применительно к случаю машины с одной охлаждающей средой, что позволяет записать, исходя из (1), следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \lambda_{11}\theta_1 - \lambda_{12}\theta_2 = \Delta P'_1; \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} - \lambda_{21}\theta_1 + \lambda_{22}\theta_2 = \Delta P'_2. \end{cases} \quad (6)$$

В (6) обозначено: C_1 и C_2 – теплоемкости элементов, отнесенных к первому и второму узлам ТДМ; $\Delta P'_1$ и $\Delta P'_2$ – мощности потерь в этих узлах; θ_1 и θ_2 – температуры соответствующих узлов; λ_{12} – тепловая проводимость между первым и вторым узлом (здесь полагаем, что $\lambda_{21} = \lambda_{12}$).

Величины λ_{11} и λ_{22} в (6) при одной охлаждающей среде определяются как

$$\lambda_{11} = \lambda_{10} + \lambda_{12} - \Delta P_{baz.1} k_{\theta 1}, \quad (7)$$

$$\lambda_{22} = \lambda_{20} + \lambda_{12} - \sum_{l=1}^{s_2} \Delta P_{baz.2(l)} k_{\theta 2(l)}, \quad (8)$$

где λ_{10} и λ_{20} – тепловые проводимости от первого и второго узла модели в охлаждающую среду.

Системе уравнений (6) соответствует схема, показанная на рисунке 6. Значения постоянных времени свободных составляющих процессов в двухмассовой ТДМ определяются модулем обратной величины корней характеристического полинома системы (6) $\det(\chi I - A) = 0$, решение которого позволяет получить выражения для этих постоянных:

$$T_1 = \frac{1}{|\chi_1|} = \frac{2C_1 C_2}{C_1 \lambda_{22} + C_2 \lambda_{11} + B_1^{0,5}}; \quad T_2 = \frac{1}{|\chi_2|} = \frac{2C_1 C_2}{C_1 \lambda_{22} + C_2 \lambda_{11} - B_1^{0,5}}, \quad (9)$$

где $B_1 = C_2^2 \lambda_{11}^2 - 2C_1 C_2 \lambda_{11} \lambda_{22} + C_1^2 \lambda_{22}^2 + 4C_1 C_2 \lambda_{12}^2$.

Важной задачей является определение параметров двухмассовой ТДМ, к которым относятся C_1 , C_2 , λ_{12} , λ_{10} и λ_{20} . Записав систему уравнений (6) для установившегося номинального режима, получим

$$\begin{cases} \lambda_{11} \tau_{1устN} - \lambda_{12} \tau_{2устN} = \Delta P_{1N(\theta_N)}; \\ \lambda_{22} \tau_{2устN} - \lambda_{12} \tau_{1устN} = \Delta P_{2N(\theta_N)}, \end{cases} \quad (10)$$

где $\tau_{1устN}$ и $\tau_{2устN}$ – превышения температуры первого и второго узлов ТДМ при работе в номинальном режиме, а $\Delta P_{1N(\theta_N)}$ и $\Delta P_{2N(\theta_N)}$ – мощность потерь в этом режиме.

Учтем, что очень важно обеспечить адекватное воспроизведение термодинамической моделью динамики изменения температуры элементов двигателя при переходных процессах. Поэтому для дополнения информации, содержащейся в уравнениях (10), воспользуемся выражениями для постоянных времени T_1 и T_2 . Поскольку мы опираемся на номинальный режим работы, будем оперировать такими значениями посто-

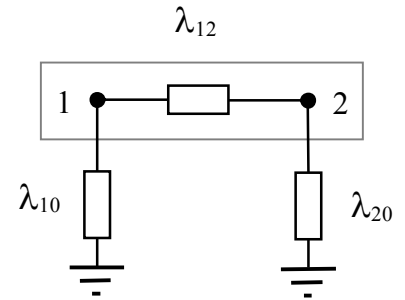


Рисунок 6 – Схема двухмассовой термодинамической модели АД

янных времени, какими они были бы при отсутствии зависимости мощности потерь от температуры ($T_{1(0)}$ и $T_{2(0)}$). Выразив $\tau_{2устN} = \vartheta_N \tau_{1устN}$, можно представить систему (10) в виде

$$\begin{cases} \lambda_{11} - \lambda_{12} \vartheta_N = \Delta P_{1N(\theta_N)} / \tau_{1устN}; \\ \lambda_{22} \vartheta_N - \lambda_{12} = \Delta P_{2N(\theta_N)} / \tau_{1устN}; \\ \lambda_{11} / C_1 + \lambda_{22} / C_2 = T_{1(0)}^{-1} + T_{2(0)}^{-1}; \\ \lambda_{11} \lambda_{22} - \lambda_{12}^2 = C_1 C_2 T_{1(0)}^{-1} T_{2(0)}^{-1}. \end{cases} \quad (11)$$

В качестве $\tau_{1устN}$ может быть принят допустимый по ГОСТ уровень превышения температуры обмотки. Система уравнений (11) содержит четыре уравнения и не позволяет определить все неизвестные параметры двухмассовой ТДМ. В работе аналитически показано, что большая постоянная T_2 двухмассовой ТДМ АД закрытого исполнения, определяющая общую длительность переходного процесса, весьма близка к постоянной времени одномассовой ТДМ, что дает возможность получить дополнительное уравнение для определения параметров двухмассовой ТДМ:

$$T_{(0)} = (C_1 + C_2)(\lambda_{11} + \lambda_{22} - 2\lambda_{12})^{-1} = T_{2(0)} / k_T, \quad (12)$$

где k_T для двигателей закрытого исполнения близко к 1.

Путем несложных преобразований систему из пяти уравнений (11) и (12), исключив постоянные времени $T_{1(0)}$ и $T_{2(0)}$, можно привести к системе из трех уравнений:

$$\begin{cases} \lambda_{11} - \lambda_{12} \vartheta_N = \Delta P_{1N(\vartheta_N)} / \tau_{1устN}; \\ \lambda_{22} \vartheta_N - \lambda_{12} = \Delta P_{2N(\vartheta_N)} / \tau_{1устN}; \\ k_T \frac{\lambda_{11} \lambda_{22} - \lambda_{12}^2}{\lambda_{11} + \lambda_{22} - 2\lambda_{12}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \left[\frac{\lambda_{11}}{C_1} + \frac{\lambda_{22}}{C_2} - \frac{\lambda_{11} + \lambda_{22} - 2\lambda_{12}}{k_T (C_1 + C_2)} \right]. \end{cases} \quad (13)$$

Таким образом, получены две системы уравнений для определения параметров двухмассовой ТДМ – с использованием и без использования постоянных времени ТДМ, ориентированные на применение при различном составе исходных данных о двигателе.

Для АД закрытого исполнения (при $k_T=1$, $\vartheta_N = \text{const}$) можно получить аналитические выражения для λ_{10} , λ_{20} и λ_{12} , решив систему (13):

$$\lambda_{20} = \frac{C_2}{C_1 + \vartheta_N C_2} \cdot \frac{\Delta P_{1N} + \Delta P_{2N}}{\tau_{1устN}}; \quad (14)$$

$$\lambda_{10} = \frac{C_1}{C_2} \lambda_{20} = \frac{C_1}{C_1 + \vartheta_N C_2} \cdot \frac{\Delta P_{1N} + \Delta P_{2N}}{\tau_{1устN}}; \quad (15)$$

$$\lambda_{12} = \frac{\vartheta_N C_2 \Delta P_{1N} - C_1 \Delta P_{2N}}{\tau_{1устN} (1 - \vartheta_N) (C_1 + \vartheta_N C_2)}. \quad (16)$$

Выполненный анализ и расчеты, проведенные для значительного числа закрытых АД, показывают, что в большинстве случаев ϑ_N находится в пределах 0,75...0,85. На рисунке 7 показаны графики нагревания для двигателя 4А100L4. Здесь обозначено: 1 и 2 – температуры лобовых (1) и пазовых (2) частей обмотки статора, рассчитанные с помощью 6-массовой ТДМ; 3 – температура первого узла (средняя температура обмотки статора) двухмассовой ТДМ с параметрами, рассчитанными по выражениям (14), (15) и (16) для $\vartheta_N=0,80$.

На рисунке 7 видно, что график средней температуры обмотки статора в двухмассовой модели весьма близок к графикам нагрева лобовых и пазовых частей обмотки, получаемых с помощью более подробной ТДМ.

При определении параметров ТДМ для защищенных двигателей величины ϑ_N и k_T рассматриваются как переменные. Это требует дополнения рассматриваемых систем еще двумя уравнениями. Первое дополнительное уравнение может быть получено приравнованием начального темпа изменения температуры $\Delta P_{1N(\theta_N)}/C_1$ и выражения для зависимости $\tau_1(t)$ при $t=0$:

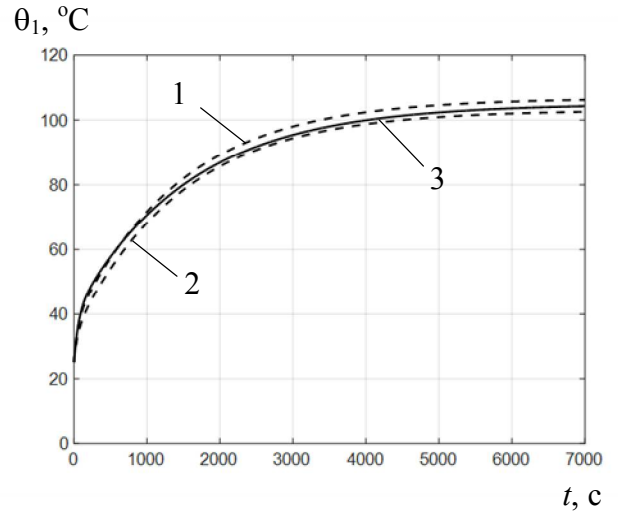


Рисунок 7 – Кривые нагрева для 6-массовой и двухмассовой ТДМ двигателя 4A100L4

$$\Delta P_{1N(\theta_N)}/C_1 = -A_{1N(\theta_N)}/T_{1(0)} - A_{2N(\theta_N)}/T_{2(0)}, \quad (17)$$

$$\text{где } A_{1N(\theta_N)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta P_{1N(\theta_N)} [\lambda_{22} (B_3 - B_1^{0,5}) + 2\lambda_{12}^2 C_2] + \Delta P_{2N} \lambda_{12} (B_4 - B_1^{0,5})}{B_1^{0,5} B_2},$$

$$A_{2N(\theta_N)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta P_{1N(\theta_N)} [\lambda_{22} (B_3 + B_1^{0,5}) + 2\lambda_{12}^2 C_2] + \Delta P_{2N(\theta_N)} \lambda_{12} (B_4 + B_1^{0,5})}{B_1^{0,5} B_2},$$

$$B_2 = \lambda_{11} \lambda_{22} - \lambda_{12}^2; \quad B_3 = C_1 \lambda_{22} - C_2 \lambda_{11}; \quad B_4 = C_1 \lambda_{22} + C_2 \lambda_{11}.$$

В качестве второго дополнительного уравнения может быть использовано выражение для установившегося превышения температуры в номинальном режиме:

$$\tau_{1устN} = (\lambda_{12} \Delta P_{2N(\theta_N)} + \lambda_{22} \Delta P_{1N(\theta_N)}) / (\lambda_{11} \lambda_{22} - \lambda_{12}^2). \quad (18)$$

Таким образом, получаем систему уравнений, позволяющую численными методами выполнить расчет параметров двухмассовой ТДМ асинхронного двигателя защищенного исполнения.

В **третьей главе** решается задача анализа возможностей использования дополнительной информации об АД для определения параметров двухмассовой ТДМ АД и разработка методики ее использования.

На основе анализа взаимосвязей конструктивных особенностей и параметров АД сформулированы предложения по использованию дополнительной информации для расчета теплоемкостей двухмассовой ТДМ АД, что позволяет сократить число неизвестных и упростить расчет остальных параметров ТДМ.

В случае определения параметров ТДМ для двигателя повторно-кратковременного режима появляется возможность использования дополнительной информации в виде каталожных данных, относящихся к режимам с различной ПВ%. Получены аналитические соотношения для расчета температуры узлов двухмассовой ТДМ АД при работе в установившемся цикле повторно-кратковременного режима (ПКР), которые дают возможность обосновать критерий оценки теплового состояния АД для ПКР с целью использования его на стадии определения параметров двухмассовой ТДМ АД. Рисунок 8 иллюстрирует различие между величиной превышения температуры обмотки статора в середине рабочего периода t_p и средним значением перегрева, вычисленным по максимальному и минимальному значениям превышений температуры на границах этого периода. В течение периода t_p вторая производная $\tau_1(t)$ отрицательна. Поэтому всегда $\tau_{1p/2} > \tau_{1cp}$. Из этого следует, что при работе в ПКР оценку теплового состояния надо проводить по критерию $\tau_{1p/2} \leq \tau_{1N}$, который является более жестким, чем критерий $\tau_{1cp} \leq \tau_{1N}$.

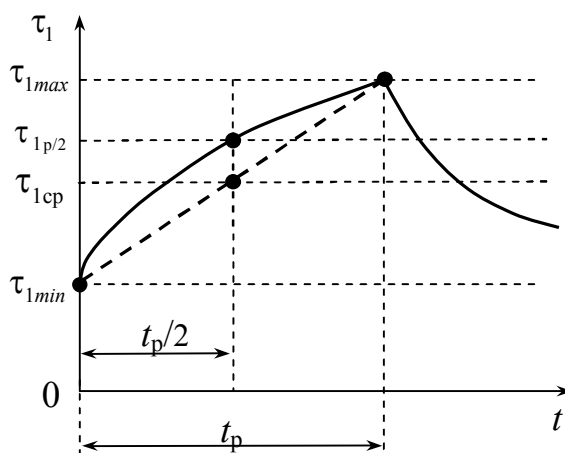


Рисунок 8 – К определению превышения температуры в середине рабочего периода, обозначено: $\tau_{1cp} = (\tau_{1max} + \tau_{1min}) / 2$

Получен набор систем уравнений и разработан алгоритм определения параметров двухмассовой ТДМ АД для ПКР при различных вариантах задания исходных данных с учетом критерия $\tau_{1p/2} \leq \tau_{1N}$.

Рассмотрены возможности использования определенных экспериментально постоянных времени с целью расчета параметров двухмассовой ТДМ.

При проведении экспериментальных исследований нагрев обмотки статора двигателя фиксировался с помощью трех термопар, расположение которых показано на рисунок 9. Регистрация сигналов с термопар проводилась с помощью системы *LabView*. В работе приведены результаты экспериментального исследования нагрева и охлаждения двигателя МТКФ012-6, выполненные на каф. ЭАПУ УрФУ (см. рисунки 10 и 11).

Показано, что нецелесообразно стремиться точно определить малую постоянную времени нагрева двухмассовой ТДМ. Даже при наличии аппаратуры, позволяющей выполнять регистрацию температуры обмотки с малой дискретностью по времени, достоверно определить значение малой постоянной сложно. Причина в том, что, поскольку двигатель не имеет лишь од-

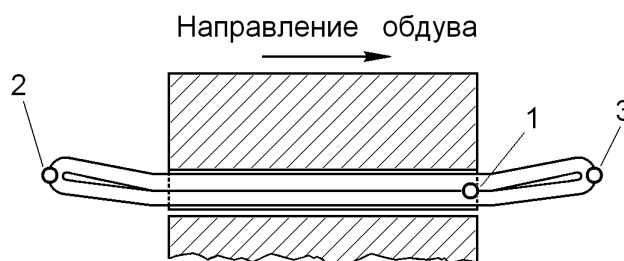


Рисунок 9 – Схема расположения термопар (цифрами обозначены позиции термопар)

ной быстрой постоянной – их больше, то попытка заменить весь набор экспонент с относительно малыми постоянными времени одной экспонентой заведомо не может привести к полному совпадению экспериментальной и аппроксимирующей кривых (это видно на рисунке 11). Вместе с тем показано, что имеется возможность весьма точно в достаточно простом эксперименте определить наибольшую постоянную нагрева, что упрощает определение параметров двухмассовой ТДМ.

Получены аналитические выражения для расчета тепловых проводимостей двухмассовой ТДМ закрытого АД с использованием экспериментально определенной наибольшей постоянной времени нагрева:

$$\lambda_{12} = \frac{\Delta P_{1N(\theta_N)}}{\tau_{1устN}(1-\vartheta_N)}; \quad \lambda_{20} = \frac{\Delta P_{1N(\theta_N)} + \Delta P_{2N(\theta_N)}}{\tau_{1устN} \vartheta_N}, \quad (19)$$

$$\text{где } \vartheta_N = \frac{a_3 + a_4 - a_2}{2a_4} + \sqrt{\left(\frac{a_3 + a_4 - a_2}{2a_4}\right)^2 + \frac{a_1 - a_3}{a_4}};$$

$$a_1 = \Delta P_{1N(\theta_N)} (\Delta P_{1N(\theta_N)} + \Delta P_{2N(\theta_N)}) / \tau_{1устN}^2; \quad a_2 = (C_1 + C_2) T_{2(0)}^{-1} \Delta P_{1N(\theta_N)} / \tau_{1устN};$$

$$a_3 = C_1 T_{2(0)}^{-1} (\Delta P_{1N(\theta_N)} + \Delta P_{2N(\theta_N)}) / \tau_{1устN}; \quad a_4 = C_1 C_2 / T_{2(0)}^2.$$

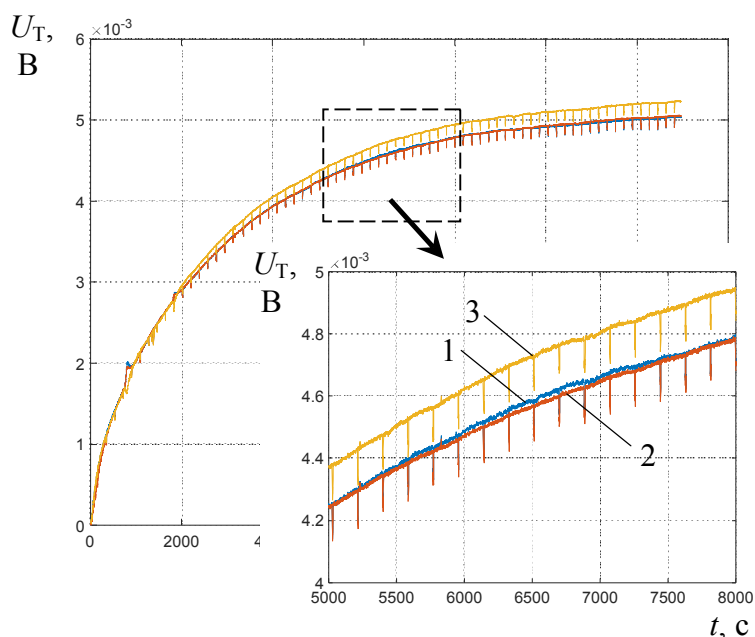


Рисунок 10 – Экспериментальные кривые нагрева обмотки статора (U_T – сигнал от термопар, В; цифры – номера термопар)

В четвертой главе решается задача разработки эффективной методики оценки теплового состояния АД на основе ресурсного подхода для различных режимов работы электропривода.

Предложен подход к эквивалентированию тепловых режимов и оценке теплового состояния электродвигателя, основанный на вычислении расхода за

время t_p термического ресурса изоляции $\Delta R_t = \int_0^{t_p} v(t) dt$, где v – скорость термического старения изоляции, обратно пропорциональная сроку службы изоляции (T) при данной температуре, определяемого по формуле Буссинга: $T = k \cdot \exp(B/Q - G)$, где Q – абсолютная температура; k, B, G – постоянные.

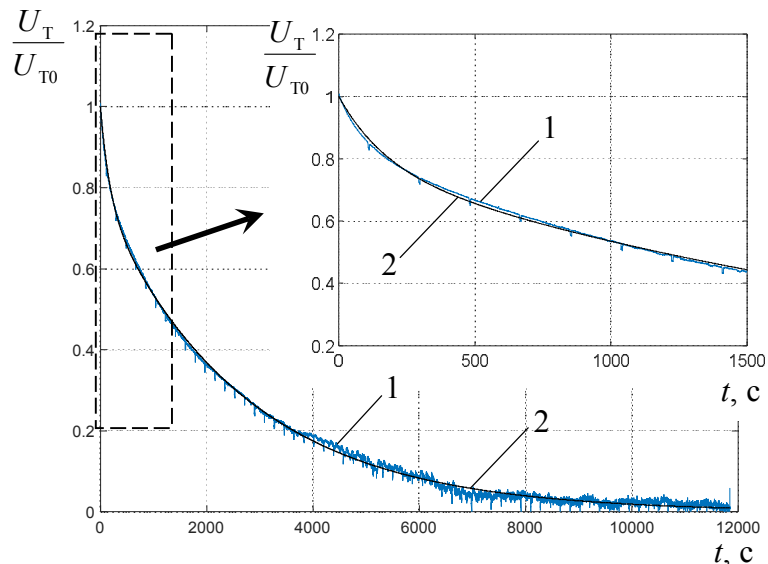


Рисунок 11 – Кривые охлаждения обмотки статора (1 – экспериментальная усредненная кривая; 2 – аппроксимация двухэкспонентной зависимостью)

Показано, что из-за нелинейной связи между скоростью термического старения изоляции и температурой любые отклонения от средней за некоторое время температуры приводят к ускорению расхода термического ресурса изоляции (см. рисунок 12, где показано, что при колебаниях температуры с разной амплитудой, но одинаковым средним значением, средняя скорость термического старения изоляции оказывается не одинаковой). Косвенные методы оценки нагрева двигателя (метод средних потерь и методы эквивалентных величин) не учитывают это обстоятельство, в то время, как ускорение расхода термического ресурса может быть весьма велико (см. рисунок 13). Поэтому с целью повышения эффективности этих методов для режимов работы с широким диапазоном изменения температуры обмотки двигателя необходимо вводить поправочный коэффициент ($k_{\Delta P}$), учитывающий ускорение расхода термического ресурса ($\Delta P_{\Sigma \text{cp}} k_{\Delta P} \leq \Delta P_{\Sigma N}; I_{\text{экр}} \sqrt{k_{\Delta P}} \leq I_N; M_{\text{экр}} \sqrt{k_{\Delta P}} \leq M_N; P_{\text{экр}} \sqrt{k_{\Delta P}} \leq P_N$).

Получено аналитическое выражение для связи поправочного коэффициента $k_{\Delta P}$ с коэффициентом ускорения расхода термического ресурса изоляции $k_v = v_{\text{cp}} / v(\theta_{\text{cp}})$:

$$k_{\Delta P} = 1 + \ln k_{vN} \frac{(\theta_{\text{доп}} + \theta_A)^2}{B \tau_{1N}} L, \quad (20)$$

где k_{vN} – коэффициент k_v при условии $\Delta P_{\Sigma cp} = \Delta P_N$; $\theta_A = 273^\circ\text{C}$; L – постоянная (см. таблицу 2). Величина k_{vN} характеризует ускорение расхода остаточного ресурса изоляции обмотки по сравнению с работой в номинальном режиме.

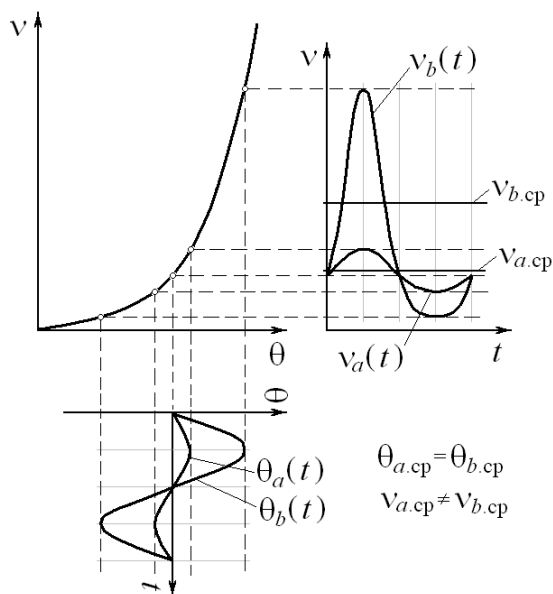


Рисунок 12 – Соотношение между средней температурой и средней за цикл скоростью старения изоляции

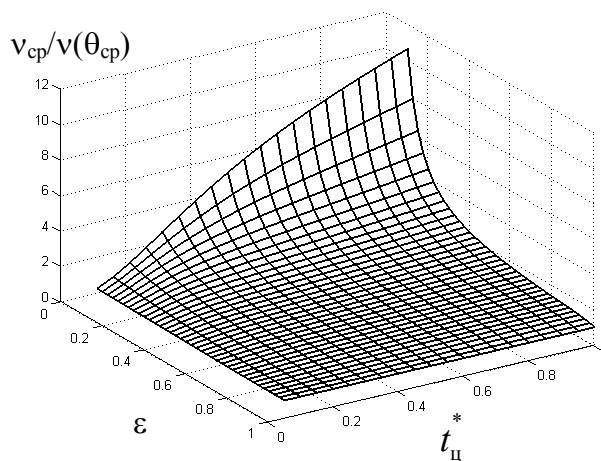


Рисунок 13 – Зависимость $v_{cp}/v(\theta_{cp})$ от параметров цикла ПКР для АД с изоляцией класса В

Таблица 2 – Значения параметра L для закрытых АД

$M_N, \text{Н}\cdot\text{м}$	<10	$10\dots200$	$200\dots1000$	>1000
$n_0, \text{об/мин}$				
500	1	1	0,95	0,9...0,95
600				0,9
750		0,95...1	0,9...0,95	0,85...0,9..
1000				0,8...0,85
1500	0,9...1	0,9...0,95	0,85...0,9	0,7...0,8
3000		0,8...0,9		

Показано, что для сложных циклов работы привода целесообразно использование прямых методов оценки теплового состояния электродвигателя, основанных на расчете изменения остаточного ресурса изоляции путем численного моделирования с использованием ТДМ АД. Приведена классификация комплексных моделей электропривода по составу и уровню детализации с анализом особенностей и целесообразности использования различных вариантов построения комплексной модели (см. таблицу 3). Серым цветом здесь отмечены варианты, рациональные для задач электропривода.

На основе универсальных ТДМ АД, построенных с использованием результатов кластеризации серии двигателей и метода генетических алгоритмов для поиска параметров ТДМ, получены логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ) ТДМ АД, позволяющие определить актуальный

частотный диапазон, в пределах которого существенно влияние колебаний температуры из-за изменений нагрузки двигателя на скорость расхода термического ресурса изоляции. Получено условие для оценки характерного периода изменения нагрузки (Δt_n), при котором это влияние существенно:

$$\Delta t_n > \Delta t_{n.min} = \frac{2\pi}{\Omega_{max}} \cdot \frac{C_{\Sigma} \vartheta_N \tau_{1доп}}{(M/M_N)^2 \Delta P_{\Sigma N}}, \quad (21)$$

где $\Omega_{max}=1200...1500$ о.е.; C_{Σ} и $\Delta P_{\Sigma N}$ – суммарная теплоемкость и мощность потерь.

Таблица 3 – Уровни детализации составляющих комплексной модели

Уровень сложности \ Модели	Электро-динамическая модель	Энергетическая модель	Термодинамическая модель	Модель механической части	Модель старения изоляции
МКЭ, CFD	ЭД1	ЭЭ1	T1	M1	И1
Обыкновенные дифференциальные уравнения (динамическая модель)	ЭД2	ЭЭ2	T2	M2	И2
Алгебраические уравнения, функции (статическая модель)	ЭД3	ЭЭ3	T3	M3	И3

Сформулированы методики использования прямой и косвенной оценки теплового состояния АД на этапе конструирования электропривода для детерминированного цикла нагружения на основе вычисления расхода термического ресурса изоляции. Приведены номограммы для определения коэффициента ускорения расхода термического ресурса при использовании косвенной оценки.

Исследованы возможности оценки теплового состояния АД при стохастическом характере нагружения. Определены условия, при которых, с целью существенного сокращения времени моделирования, возможна замена графика стохастического нагружения простейшим детерминированным циклом нагружения при условии равенства их средних и среднеквадратичных отклонений и получены выражения для параметров эквивалентного по этим условиям простейшего детерминированного цикла.

Рассмотрены возможности аналитической оценки теплового состояния АД при стохастическом характере нагружения на этапе конструирования электропривода. Получены аппроксимирующие выражения для коэффициента ускорения расхода термического ресурса изоляции при работе электропривода в режиме стохастического нагружения, позволяющие учесть нелинейность связи скорости старения изоляции и температуры обмотки при оценке теплового состояния АД на этапе выбора и проверки двигателя методами средних потерь и эквивалентных величин:

$$k_v = \exp(c_k \Delta t^\alpha \sigma_{\Delta P}^\beta), \quad (22)$$

где Δt – характерная продолжительность интервалов нагружения; $\sigma_{\Delta P}$ – среднеквадратичное отклонение мощности потерь; c_k , α и β – постоянные коэффициенты (например, для АД серии 4А с изоляцией класса В, при

равномерном распределении амплитуды нагрузки, усредненные значения этих коэффициентов: $c_k= 9,81$, $\alpha= 0,66$ и $\beta=2,03$). На рисунках 14 и 15 показаны зависимости $k_v(\sigma_{\Delta P})$ для двигателей различных кластеров, построенные по выражению (22) при равномерном распределении амплитуды нагрузки, кружками показаны точки, построенные по результатам моделирования, пунктиром – огибающая по максимальным расчетным значениям k_v .

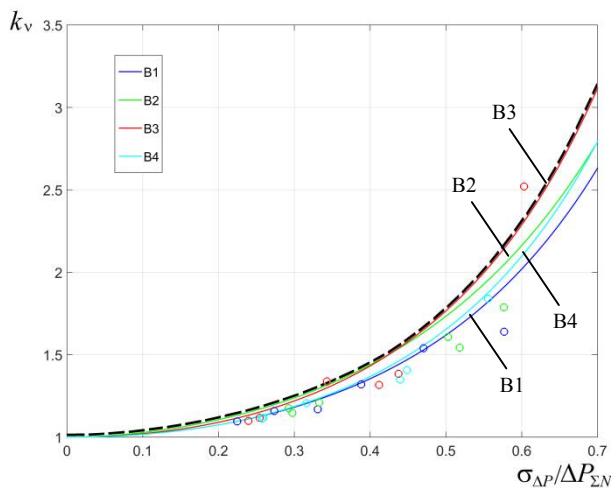


Рисунок 14 – Зависимости $k_v(\sigma_{\Delta P})$ для изоляции класса В при $\Delta t/t_6=0,1$

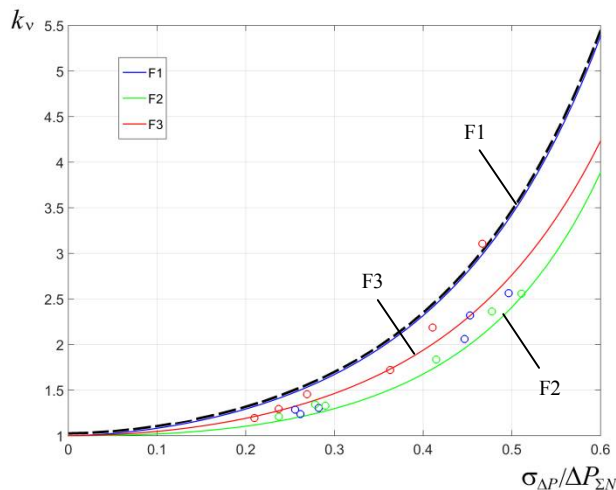


Рисунок 15 – Зависимости $k_v(\sigma_{\Delta P})$ для изоляции класса F при $\Delta t/t_6=0,1$

В пятой главе решается задача исследования возможности мониторинга теплового состояния АД и расхода ресурса изоляции в ходе эксплуатации электропривода. Предложен вариант построения двухмассовой ТДМ закрытого АД (двухканальная ТДМ АД), требующий минимального объема информации для параметрирования, с целью использования в системах тепловой защиты двигателя (см. рисунок 16). На рисунке 16 обозначено: T_{1outN} и T_{2outN} – постоянные времени быстрого и медленного каналов; F_1 и F_2 – функции, определяющие влияние скорости на постоянные времени модели.

Предложены алгоритмы работы системы тепловой защиты на основе двухканальной ТДМ АД – с использованием только быстрого канала (без непосредственного расчета превышения температуры обмотки) и с использованием обоих каналов ТДМ. Первый вариант требует измерения лишь тока статора и скорости двигателя. Второй вариант предусматривает непосредственный расчет превышения температуры обмотки, но позволяет упростить решение

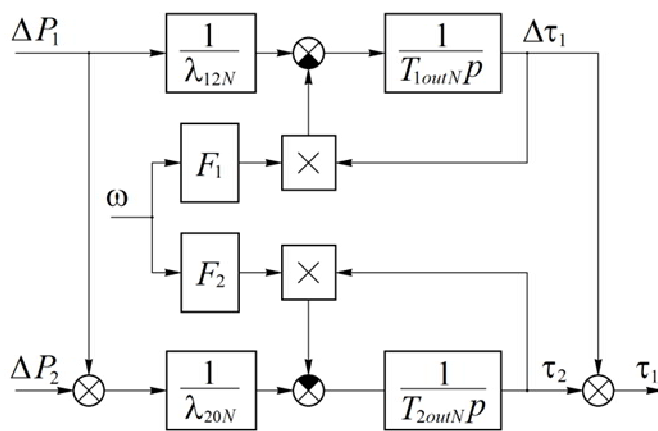


Рисунок 16 – Преобразованная структурная схема двухмассовой ТДМ АД с разделением процессов

проблемы определения начальных условий для ТДМ при возобновлении работы после отключения привода. Получены соотношения, позволяющие учесть зависимость постоянных времени двухканальной ТДМ АД от скорости двигателя. Также предложены варианты системы мониторинга теплового состояния АД на основе усреднения скорости термического старения изоляции с помощью скользящего окна (обеспечивается более высокая эффективность оценки теплового состояния за счет учета нелинейной связи скорости деградационных процессов в изоляции с температурой обмотки) и на основе вычисления остаточного термического ресурса изоляции. Приведены алгоритмы работы для обоих вариантов как при использовании ТДМ, так и при использовании средств измерения температуры обмотки.

Предложен подход к мониторингу и прогнозированию состояния изоляции обмотки электродвигателя на основе использования информации об эффективном значении емкостных токов утечки. Экспериментальные исследования показывают, что четко прослеживается экспоненциальная связь величины емкостного тока утечки изоляции обмотки электродвигателя с процессом нарастания деградационных изменений в слое изоляции с течением времени (см. рисунок 17, где показан график полного тока утечки, включающего емкостную и резистивную компоненту в ходе экспериментов по ускоренному старению изоляции обмотки статора асинхронного двигателя)¹⁾. Эту связь можно описать аппроксимирующей зависимостью

$$I_y = \Delta I_{y,max} e^{-\alpha_y t} + I_{y0}, \quad (23)$$

которую будем называть моделирующей экспонентой.

Исследования, проведенные на кафедре ЭАПУ УрФУ, показали возможность регистрации емкостных токов утечки (I_y), возникающих при подаче прямоугольных импульсов напряжения, когда обеспечивается значительно большая амплитуда I_y по сравнению с синусоидальным напряжением. Однако установлено, что быстро протекающие переходные процессы $I_y(t)$ в этом случае требуют оборудования, обеспечивающего высокое временное разрешение (см. рисунок 18) и процесс регистрации сложно поддается автоматизации.

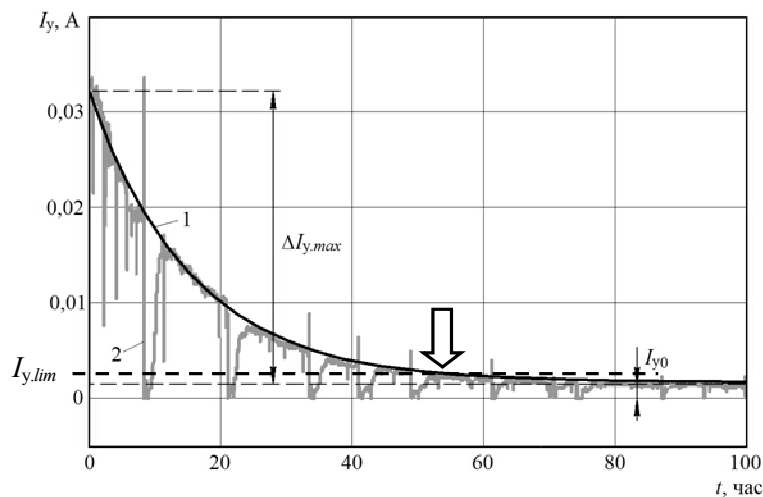


Рисунок 17 – Аппроксимация полного тока утечки экспонентой (1), наложенная на экспериментальную зависимость (2)

¹⁾ Younsi, K. On-line capacitance and dissipation factor monitoring of AC stator insulation / K. Younsi, P. Neti, M. Shah, J. Zhou, J. Krahn, K. Weeber, C. Whitefield // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2010. – Vol. 17. – Issue. 5. – Pp. 1441–1452.

Поэтому предложено использовать в качестве характеристики величины емкостных токов утечки их эффективное значение, вычисляемое за период прохождения достаточно большого количества генерирующих импульсов напряжения (см. рисунок 19).

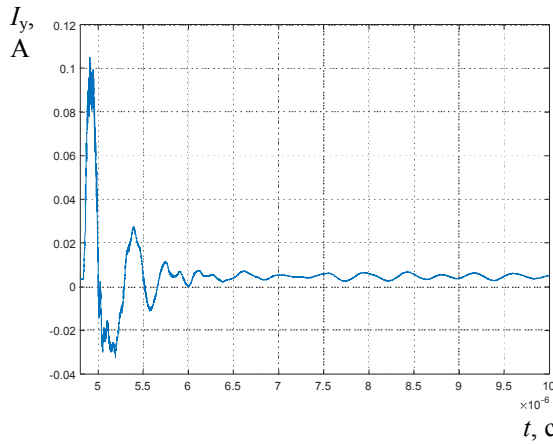


Рисунок 18 – Емкостной ток утечки при нарастающем фронте напряжения

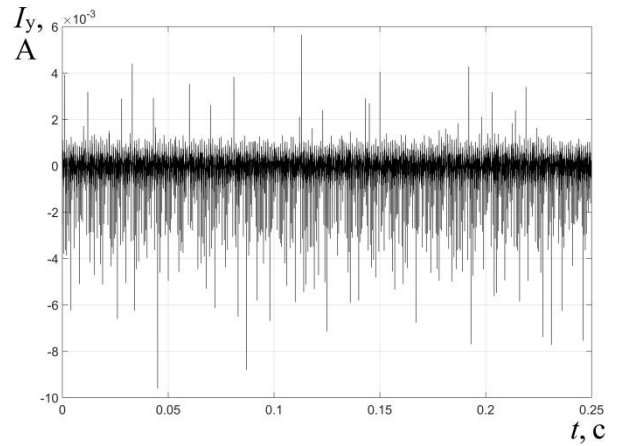


Рисунок 19 – Емкостной ток утечки при частоте 1 кГц в течение 0,25 с

Выявленный характер зависимости (23) емкостного тока утечки в процессе старения изоляции позволяет построить систему мониторинга состояния изоляции на основе контроля превышения величины I_y над некоторым уровнем $I_{y.lim}$, снижение I_y ниже которого свидетельствует об исчерпании ресурса изоляции.

Проблема здесь заключается в сильном зашумлении полезного сигнала. При таких условиях представляется целесообразным опираться не столько на фильтрацию и сглаживание сигнала, сколько на идентификацию параметров моделирующей кривой $I_y(t)$ с последующей оценкой времени (t_{lim}) достижения порогового уровня $I_{y.lim}$ (пересечение уровня $I_{y.lim}$ отмечено на рисунке 17 стрелкой). Из формулы (23) можно получить выражение для t_{lim}

$$t_{lim} = \frac{1}{\alpha_y} \ln \frac{\Delta I_{y.max}}{I_{y.lim} - I_{y0}} \quad (24)$$

Приведен алгоритм работы системы прогнозирования на основе идентификации параметров моделирующей кривой. Результаты моделирования работы алгоритма

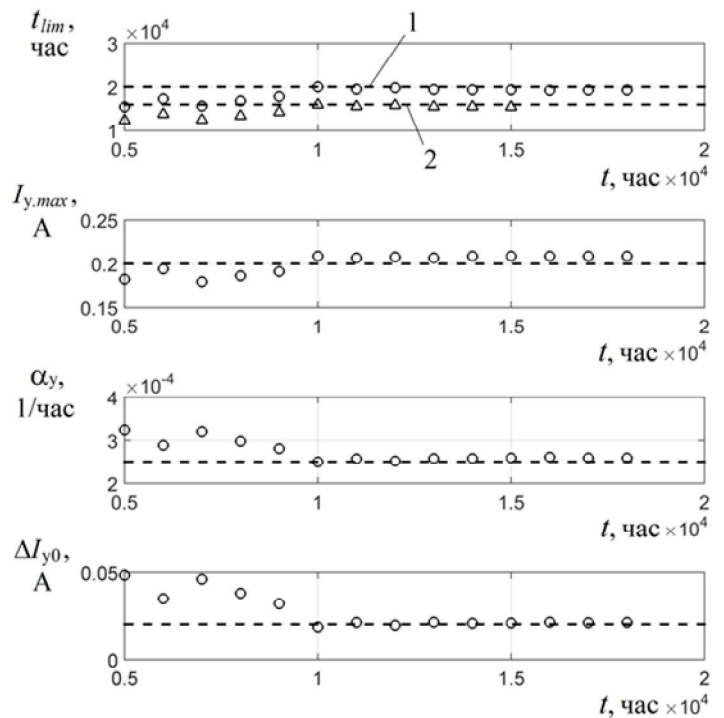


Рисунок 20 – Результаты моделирования работы алгоритма системы прогнозирования состояния изоляции. Обозначено: 1 – $\Delta I_{y.lim} = 0,0067 \Delta I_{y.max}$; 2 – $\Delta I_{y.lim} = 0,0183 \Delta I_{y.max}$

системы прогнозирования состояния изоляции показаны на рисунке 20. Моделировалась работа алгоритма с интервалом измерений 100 час без пред-фильтрации, при гауссовском законе распределения погрешности со средним квадратичным отклонением 20% от величины I_y .

Идентификация параметров моделирующей экспоненты проводилась с использованием метода наименьших квадратов.

В **шестой главе** решается задача исследования теплового состояния АД в пусковых режимах и вопросы согласования параметров двигателя и механической части с учетом особенностей системы электропривода. Показана актуальность задачи снижения теплового воздействия на обмотку ротора при пуске крупных АД, когда ее температура может достигать 400°C и более.

Рассмотрены особенности нагрева обмотки ротора АД в пусковых режимах. Исходя из уравнения теплового баланса для греющихся элементов ротора АД при пуске с постоянной частотой питающего напряжения построено уравнение Фредгольма второго рода и найдено его аналитическое решение, позволяющее определить подъем температуры этих элементов ($\Delta\theta_r$) к концу пуска электропривода с учетом отдачи тепла в окружающую среду

$$\Delta\theta_r = \Delta\theta'_r \left\{ 1 - \chi_r t_{\text{п}} \left[a_{\lambda r} + \frac{b_{\lambda r}}{n\beta_r + 1} \left(\frac{\omega_{\text{кон}}}{\omega_N} \right)^{\beta_r} \right] \right\}^{-1}, \quad (25)$$

где $\Delta\theta'_r = W_{\Sigma r} / C_r$ – адиабатический подъем температуры; $W_{\Sigma r}$ – суммарная энергия, выделяющаяся в рассматриваемых элементах ротора; C_r – суммарная энергия греющихся элементов ротора; $t_{\text{п}}$ – время пуска; $\chi_r = -\bar{k}_{\theta r} / T_{r.outN}$ – характеристическое число интегрального уравнения; $T_{r.outN}$ – постоянная времени теплоотдачи от греющихся элементов ротора; $\bar{k}_{\theta r}$ – усредненный коэффициент, характеризующий изменение потока тепла в окружающую среду при изменении температуры греющихся элементов ($\bar{k}_{\theta r} \approx 0,5$); $\omega_{\text{кон}}$ и ω_N – конечная и номинальная скорость двигателя; $a_{\lambda r}$, $b_{\lambda r}$, β_r , n – постоянные, характеризующие зависимости теплоотдачи от скорости и скорости от времени.

Показано, что при расчете подъема температуры сварной обмотки ротора в пусковых режимах адиабатический подход может давать существенную ошибку, в то время, как для ротора с литой обмоткой (с учетом выравнивания температуры стали и обмотки) ошибка невелика (см. рисунок 21). Поэтому расчет подъема температуры сварной обмотки ротора при пуске следует выполнять по аналитическому выражению (25), полученному на основе решения уравнения Фредгольма, либо путем математического моделирования.

Создана комплексная модель, позволяющая воспроизводить и визуализировать процессы нагрева элементов двигателя, которые не могут быть исследованы экспериментально. Сравнением результатов, полученных с использованием предложенных аналитических выражений и результатов численного моделирования с помощью комплексной модели, показано, что наиболее точная оценка максимума температуры достигается при рассмотрении нагрева стержней сварной обмотки ротора отдельно от короткозамыкающих

колец. Получены выражения, позволяющие выполнить приближенный учет разницы между средней температурой всей обмотки ротора и ее стержней.

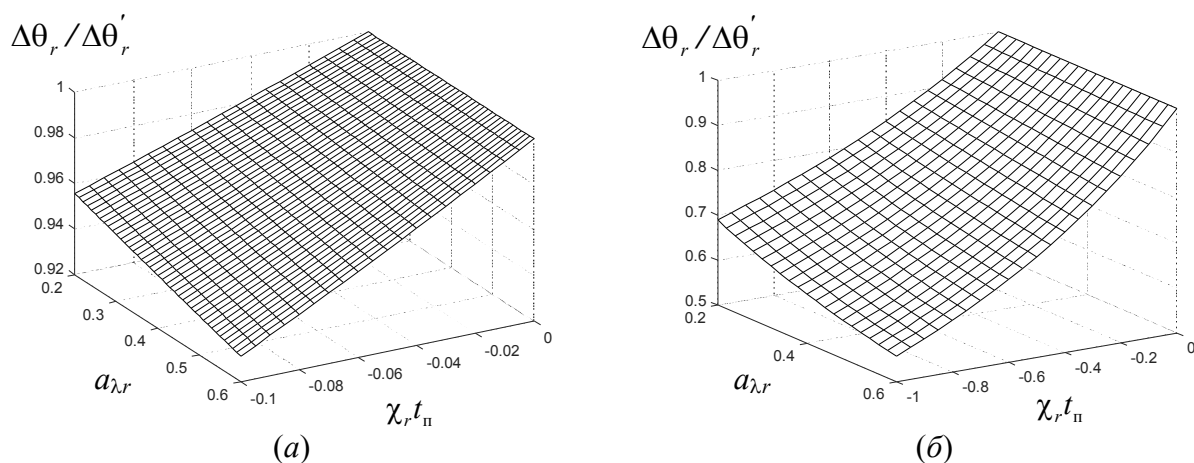


Рисунок 21 – Графики $\Delta\theta_r / \Delta\theta'_r$ от $\chi_r t_{\pi}$ и $a_{\lambda,r}$ при пуске с вентиляторным моментом сопротивления для АД с литой (а) и со сварной (б) обмоткой ротора

Показана возможность существенного снижения нагрева роторной обмотки при пуске за счет перехода к менее скоростному АД той же мощности за счет уменьшения передаточного числа редуктора. Получены выражения для пересчета допустимого присоединенного момента инерции при различных механических характеристиках механизмов из условия равного нагрева обмотки ротора при пуске.

Показано, что для сравнительно небольших АД в длительных пусковых режимах под нагрузкой при постоянной частоте напряжения возможен перегрев обмотки статора. Получено аналитическое решение уравнения Фредгольма второго рода для обмотки статора АД, аналогичное выражению (25), позволяющее определить подъем ее температуры к концу пуска электропривода. Аналитически определено условие, при котором увеличение продолжительности пуска в электроприводе с тиристорным преобразователем напряжения за счет уменьшения ограничения тока статора (в системе, замкнутой по току статора) или за счет уменьшения темпа задатчика интенсивности (в системе, замкнутой по скорости) будет приводить к снижению нагрева обмотки. Описаны технические решения, защищенные тремя патентами на полезную модель, позволяющие снизить нагрев обмотки статора АД в пусковых режимах электропривода конвейеров за счет сокращения времени разгона, которое становится возможным благодаря автоматическому регулированию натяжения конвейерной ленты с целью предотвращения ее проскальзывания.

В **заключении** диссертации сформулированы основные результаты работы:

1. Получено обобщенное математическое описание термодинамической модели электрической машины для произвольного количества узлов и охлаждающих сред, выполнен его анализ и показано, что при учете температурной зависимости мощности потерь в узлах ТДМ возможна ситуация неограниченного увеличения температуры узлов без выхода на установившийся

уровень и аналитически определены условия возникновения этой ситуации. Проведен анализ влияния температурной зависимости теплоемкостей и тепловых проводимостей ТДМ электрической машины и определены условия, при которых необходимо учитывать эти зависимости в ходе моделирования. Показано, что число обусловленности матрицы системы ТДМ, оказывающее существенное влияние на требования к вычислительным ресурсам при моделировании, зависит от количества узлов ТДМ и может быть уменьшено за счет снижения размерности решаемой системы путем структурных преобразований.

2. Выполнен анализ наиболее часто встречающихся термодинамических схем АД, который позволяет сформулировать рекомендации относительно компоновки узлов для упрощенных ТДМ и обоснована целесообразность использования для оценки теплового состояния АД в задачах электропривода двухмассовой ТДМ с выделением в качестве отдельного узла обмотки статора. Получено математическое описание двухмассовой термодинамической модели АД и проведен его анализ.

3. Получены основные соотношения, пригодные для определения параметров двухмассовой ТДМ АД и сформированы две системы уравнений – с использованием и без использования постоянных времени ТДМ, ориентированные на применение при различном составе исходных данных о двигателе. Получены формулы, позволяющие выполнить аналитическим путем расчет тепловых проводимостей двухмассовой ТДМ АД для продолжительного режима работы. Получены аналитические соотношения для расчета температуры узлов двухмассовой ТДМ АД при работе в установившемся цикле ПКР, которые дают возможность обосновать критерий оценки теплового состояния АД для этого режима с целью использования на стадии определения параметров двухмассовой ТДМ АД и разработан алгоритм определения параметров двухмассовой ТДМ АД для ПКР при различных вариантах задания исходных данных. Приведены результаты экспериментального исследования нагрева и охлаждения двигателя МТКФ012-6, выполненные на кафедре ЭАПУ УрФУ. Показано, что нецелесообразно стремиться точно определить малую постоянную времени нагрева двухмассовой ТДМ. Достоверно определить значение малой постоянной сложно даже при наличии аппаратуры, позволяющей выполнять регистрацию температуры обмотки с малой дискретностью по времени. Вместе с тем, имеется возможность весьма точно в достаточно простом эксперименте определить наибольшую постоянную нагрева, что упрощает определение параметров двухмассовой ТДМ. Получены аналитические выражения для расчета тепловых проводимостей двухмассовой ТДМ с использованием экспериментально определенной наибольшей постоянной времени нагрева.

4. Предложен подход к эквивалентированию тепловых режимов и оценке теплового состояния электродвигателя, основанный на вычислении расхода термического ресурса изоляции. Показано, что для сложных циклов работы привода целесообразно использование прямых методов проверки теплового состояния электродвигателя на основе этого подхода, что возможно с использованием методов численного моделирования с помощью ТДМ АД. Приведена методика использования прямой оценки теплового состояния АД на

этапе конструирования электропривода для детерминированного цикла нагружения на основе вычисления расхода термического ресурса. Показано, что при использовании классических косвенных методов проверки электродвигателя по нагреванию, таких, как метод средних потерь и методы эквивалентных величин, необходимо использовать поправочный коэффициент, учитывающий нелинейность зависимости скорости термического старения изоляции от температуры. Получено аналитическое выражение для связи этого поправочного коэффициента с коэффициентом ускорения расхода термического ресурса изоляции при колебаниях температуры обмотки. Сформулирована методика использования косвенной оценки теплового состояния АД на этапе конструирования электропривода для детерминированного цикла нагружения на основе использования классических методов с учетом коэффициента ускорения расхода термического ресурса изоляции. Приведены номограммы для определения этого коэффициента. Определены условия, при которых, с целью существенного сокращения трудоемкости моделирования, возможна замена графика стохастического режима нагружения простейшим детерминированным циклом при условии равенства их средних и среднеквадратичных отклонений и получены выражения для параметров эквивалентного по этим условиям простейшего детерминированного цикла. Получены аппроксимирующие выражения для коэффициента ускорения расхода термического ресурса изоляции при работе электропривода в режиме стохастического нагружения, позволяющие учесть нелинейность связи скорости старения изоляции и температуры обмотки при оценке теплового состояния АД на этапе выбора и проверки двигателя методами средних потерь и эквивалентных величин.

5. Предложен вариант построения двухмассовой ТДМ закрытого АД (двухканальная ТДМ АД), требующий минимального объема информации для параметрирования, с целью использования в системах тепловой защиты двигателя. Приведен алгоритм работы системы тепловой защиты на основе двухканальной ТДМ АД с расчетом превышения температуры обмотки, позволяющий упростить решение проблемы определения начальных условий для ТДМ при возобновлении работы после отключения привода. Приведен алгоритм работы упрощенной системы тепловой защиты на основе двухканальной ТДМ АД с использованием только быстрого канала термодинамической модели, требующий измерения лишь тока статора и скорости двигателя, а также получены соотношения, позволяющие учесть зависимость тепловых проводимостей ТДМ АД от скорости в такой системе. Предложена система мониторинга теплового состояния АД на основе усреднения скорости старения изоляции с помощью скользящего окна и приведены алгоритмы работы такой системы с использованием ТДМ и с использованием средств измерения температуры обмотки. Предложена система мониторинга теплового состояния АД на основе вычисления остаточного термического ресурса изоляции и приведены алгоритмы работы такой системы с использованием ТДМ и с использованием средств измерения температуры обмотки.

6. Предложен подход к мониторингу и прогнозированию состояния изоляции обмотки электродвигателя на основе использования информации об

эффективном значении емкостных токов утечки. Приведен алгоритм работы такой системы прогнозирования на основе идентификации параметров моделирующей кривой.

7. Получено аналитическое решение уравнения Фредгольма второго рода для греющихся элементов ротора, построенного на основе теплового баланса, позволяющее определить подъем температуры этих элементов к концу пуска электропривода. Показано, что при расчете подъема температуры сварной обмотки ротора в пусковых режимах адиабатический подход может давать существенную ошибку, в то время, как для ротора с литой обмоткой (с учетом выравнивания температуры стали и обмотки) ошибка невелика. Поэтому расчет подъема температуры сварной обмотки ротора при пуске следует выполнять по аналитическим выражениям, полученным на основе решения уравнения Фредгольма, либо путем математического моделирования. Создана комплексная модель, позволяющая воспроизводить и визуализировать процессы нагрева элементов двигателя, которые не могут быть исследованы экспериментально. Сравнением результатов, полученных с использованием предложенных аналитических выражений и результатов численного моделирования с помощью комплексной модели, показано, что наиболее точная оценка максимума температуры достигается при рассмотрении нагрева стержней сварной обмотки ротора отдельно от короткозамыкающих колец. Получены выражения, позволяющие выполнить приближенный учет разницы между средней температурой всей обмотки ротора и ее стержней. Получено аналитическое решение уравнения Фредгольма второго рода для обмотки статора АД, позволяющее определить подъем ее температуры к концу пуска электропривода. Аналитически определено условие, при котором увеличение продолжительности пуска в электроприводе с тиристорным преобразователем напряжения за счет уменьшения ограничения тока статора (в системе, замкнутой по току статора) или за счет уменьшения темпа задатчика интенсивности (в системе, замкнутой по скорости) будет приводить к снижению нагрева обмотки. Описаны решения, позволяющие снизить нагрев обмотки статора АД в пусковых режимах электропривода конвейеров за счет сокращения времени разгона, которое становится возможным благодаря автоматическому регулированию натяжения конвейерной ленты с целью предотвращения ее проскальзывания.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования представляется целесообразным ориентировать на следующие направления:

- обобщение подхода, рассмотренного в работе для асинхронных двигателей на другие типы электрических машин;
- продолжение работ по мониторингу состояния изоляции обмоток двигателя на основе емкостных токов утечки в рамках задачи по созданию комплексной системы мониторинга состояния и ресурса электродвигателя;
- продолжение работ по созданию защит электрических машин, в том числе с использованием нейросетевых технологий и нечеткой логики.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. **Метельков, В.П.** Математическая модель спуско-подъемного агрегата буровой установки / А.М. Зюзев, В.П. Метельков, В.Н. Радченко. Изв. вузов. Горный журнал. – 2003. – № 5. – С. 22–30. 0,25 п. л. / 0,13 п. л.
2. **Метельков, В.П.** Программный комплекс для исследования эксплуатационных режимов электроприводов буровых установок / А.М. Зюзев, В.М. Липанов, В.П. Метельков, В.Н. Поляков, А.С. Попов, В.Ф. Шутько // Электротехника. – 2003. – № 7. – С. 25–31. 0,48 п. л. / 0,24 п. л.
3. **Метельков, В.П.** Математическое моделирование режимов работы бурового насоса / В.А. Дорошенко, А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Изв. вузов. Горный журнал. – 2004. – № 1. – С. 65–70. 0,20 п. л. / 0,10 п. л.
4. **Метельков, В.П.** Разработка и применение программных средств для исследования систем электроприводов / М.Ю. Бородин, А.М. Зюзев, А.В. Костылев, В.П. Метельков, В.Н. Поляков // Электротехника. – 2004. – № 9. – С. 50–57. 0,58 п. л. / 0,3 п. л.
5. **Метельков, В.П.** Исследование пусковых режимов электропривода конвейеров / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Электротехника. – 2009. – № 9. – С. 41–45. 0,20 п. л. / 0,10 п. л.
6. **Метельков, В.П.** Термодинамическая модель асинхронного двигателя для электроприводов с интенсивными процессами тепловыделения / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – Ч. 1. – С. 138–145. 0,30 п. л. / 0,15 п. л.
7. **Метельков, В.П.** Пусковые режимы электропривода ленточного конвейера с учетом ограничений по нагреву двигателя / А.М. Зюзев, Г.Г. Кожушко, В.П. Метельков // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2012. – № 6. – С. 71–75. 0,24 п. л. / 0,12 п. л.
8. **Метельков, В.П.** Управление пусковыми режимами асинхронного тиристорного электропривода с учетом ограничений по нагреву и влиянию на сеть / А.М. Зюзев, В.П. Метельков, Д.П. Степанюк // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 40–43. 0,22 п. л. / 0,11 п. л.
9. **Метельков, В.П.** Термодинамические модели для проверки асинхронного двигателя по нагреванию / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 48–52. 0,29 п. л. / 0,15 п. л.
10. **Метельков, В.П.** Оценка ресурса изоляции обмотки статора асинхронного двигателя при работе в циклических режимах / В.П. Метельков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 96–101. 0,32 п. л. / 0,32 п. л.
11. **Метельков, В.П.** К оценке теплового состояния асинхронного двигателя в повторно-кратковременном режиме / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Электротехника. – 2014. – № 9. – С. 19–23. 0,28 п. л. / 0,14 п. л.
12. **Метельков, В.П.** Учет колебаний температуры обмотки статора асинхронного двигателя при проверке по нагреванию в повторно-кратковременном

режиме / А.М. Зюзов, В.П. Метельков // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 4. – С. 146–153. 0,46 п. л. / 0,30 п. л. (Scopus).

13. **Метельков, В.П.** О температурной зависимости параметров термодинамических моделей электродвигателей / А.М. Зюзов, В.П. Метельков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 2 (544). – С. 12–17. 0,32 п. л. / 0,16 п. л.

14. **Метельков, В.П.** Влияние колебаний температуры на долговечность изоляции обмотки статора асинхронных двигателей в случайных режимах нагружения / И.Я. Браславский, В.П. Метельков, Д.В. Есаулкова, А.В. Костылев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 2 (544). – С. 18–23. 0,30 п. л. / 0,15 п. л.

15. **Метельков, В.П.** О расчете параметров двухмассовой термодинамической модели асинхронного двигателя / В.П. Метельков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16. – № 1. – С. 58–65. 0,45 п. л. / 0,45 п. л.

16. **Метельков, В.П.** Теоретические аспекты построения термодинамических моделей электродвигателей / В.П. Метельков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16. – № 2. – С. 82–89. 0,47 п. л. / 0,47 п. л.

17. **Metelkov, V.P.** Application of integral equations for analysis of electrodynamic and thermal processes in electric drive / M.Yu. Borodin, E.M. Borodin, V.P. Metelkov // Proc. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2016). – Chelyabinsk, Russia, 19-20 May 2016. – 7911533. – Pp. 1–4. 0,29 п. л. / 0,15 п. л. (Scopus).

18. **Metelkov, V.P.** Toward the evaluation of the influence of temperature fluctuations on the durability of the stator winding insulation of asynchronous motors in random mode loading / I.Ya. Braslavsky, V.P. Metelkov, D.V. Esaulkova, A.V. Kostylev, K.A. Kondakov // 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2016). – Anacapri, Italy, 22-24 June 2016. – 7525821. – Pp. 447–451. 0,37 п. л. / 0,20 п. л. (Scopus).

19. **Metelkov, V.P.** Evaluation of dynamic properties of the TEFC induction motors thermal models / I.Ya. Braslavskiy, V.P. Metelkov, A.V. Kostylev, D.V. Esaulkova // Conf. Proc. 2016 9th International Conference on Power Drives Systems (ICPDS 2016). – Perm, Russia, 3–7 Oct. 2016. – 7756677. – Pp. 1–5. 0,35 п. л. / 0,20 п. л. (Scopus).

20. **Metelkov, V.P.** Research of the start-up modes of multi-stage blower asynchronous drive / A.M. Ziuzev, V.P. Metelkov // Conf. Proc. 2016 9th International Conference on Power Drives Systems (ICPDS 2016). – Perm, Russia, 3–7 Oct. 2016. – 7756738. – Pp 1–5. 0,34 п. л. / 0,20 п. л. (Scopus).

21. **Метельков, В.П.** Аналитический метод оценки нагрева обмотки ротора высоковольтных асинхронных двигателей в пусковых режимах / А.М. Зюзов, В.П. Метельков // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 1 (34). – С. 60–67. 0,55 п. л. / 0,30 п. л.

22. **Metelkov, V.P.** Some peculiarities of the simulation of electric drives with random mode loading / I.Y. Braslavskiy, V.P. Metelkov, D.V. Esaulkova, A.V. Kostylev

// Proc. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017). – Saint-Petersburg, Russia, 16–19 May 2017. – 8076306. 0,32 п. л. / 0,16 п. л. (Scopus).

23. **Metelkov, V.P.** On an estimate of the rotor winding temperature at start-up of high-voltage induction motor / A.M. Ziuzev, V.P. Metelkov // Proc. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017). – Saint-Petersburg, Russia, 16–19 May 2017. – 8076308. 0,55 п. л. / 0,30 п. л. (Scopus).

24. **Метельков, В.П.** Двухканальная термодинамическая модель асинхронного двигателя для систем тепловой защиты / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 2 (39). – С. 4-11. 0,52 п. л. / 0,30 п. л.

25. **Метельков, В.П.** Оценка влияния колебаний нагрузки на ресурс изоляции асинхронных двигателей / И.Я. Браславский, В.П. Метельков, Д.В. Есаулкова, А.В. Костылев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18– № 3. – С. 81–87. 0,30 п. л. / 0,15 п. л.

26. **Metelkov, V.P.** Simplified method of taking into account temperature fluctuations influence on durability of induction motors stator winding insulation / I.Ya. Braslavsky, V.P. Metelkov, D.V. Esaulkova, A.V. Kostylev // Proc. 2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives, ACED 2018. Ekaterinburg, Russia, April 2018. – Pp. 1–4. 0,29 п. л. / 0,15 п. л. (Scopus).

27. **Metelkov, V.P.** On heating induction motor rotor at start-up of high-inertia mechanisms / A.M. Ziuzev, V.P. Metelkov // Proc. 2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives, ACED 2018. Ekaterinburg, Russia, April 2018. – Pp. 1–5. 0,38 п. л. / 0,20 п. л. (Scopus).

28. **Metelkov, V.P.** Method for monitoring the condition of the motor winding insulation / V.P. Metelkov, M.Yu. Borodin, K.A. Kondakov, K.E. Nesterov // Proc. 2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives, ACED 2018. Ekaterinburg, Russia, April 2018. – Pp. 1–5. 0,28 п. л. / 0,15 п. л. (Scopus).

29. **Метельков, В.П.** О проблеме перегрева обмотки ротора асинхронных двигателей в пусковых режимах высокоинерционных электроприводов нефтегазовой и горной промышленности / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 7. – С. 96–103. 0,48 п. л. / 0,24 п. л. (Scopus).

30. **Метельков, В.П.** О возможности использования токов утечки для оценки состояния изоляции асинхронного двигателя / В.П. Метельков, М.Ю. Бородин, К.А. Кондаков, К.Е. Нестеров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 67–74. 0,14 п. л. / 0,07 п. л.

31. **Метельков, В.П.** Система оценки остаточного ресурса изоляции обмотки асинхронного двигателя на основе емкостных токов утечки / В.П. Метельков, А.М. Зюзев, И.В. Черных // Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – № 1(42). – С. 53–58. 0,40 п. л. / 0,30 п. л.

Патенты:

32. Пат. на полезную модель № 96565 РФ, МПК В65G 23/44 (2006.01). Ленточный конвейер / Я.Л. Либерман, **В.П. Метельков**; патентообладатель ФГАО ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». – № 2009147425/22, заявл. 21.12.2009; опубл. 10.08.2010, бюл. № 22.

33. Пат. на полезную модель № 96564 РФ, МПК В65G 15/28 (2006.01). Ленточный конвейер / Я.Л. Либерман, **В.П. Метельков**; патентообладатель ФГАО ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». – № 2009147427/22, заявл. 21.12.2009; опубл. 10.08.2010, бюл. № 22.

34. Пат. на полезную модель № 97721 РФ, МПК В65G 23/44 (2006.01). Конвейер / Я.Л. Либерман, **В.П. Метельков**; патентообладатель ФГАО ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». – № 2009147433/11, заявл. 21.12.2009; опубл. 20.09.2010, бюл. № 26.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

35. Свид. об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003610813 РФ. Программный моделирующий комплекс «Электропривод бурового агрегата» («ЭЛЬБА») / В.А. Дорошенко, А.М. Зюзев, В.М. Липанов, **В.П. Метельков**, В.В. Новиков, В.Н. Поляков, А.С. Попов, В.Ф. Шутько; патентообладатель ФГАО ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». – № 2003610272; заявл. 03.02.2003; зарегистр. 02.04.2003 г.

36. Свид. об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003612481 РФ. Программный моделирующий комплекс «Электропривод станка-качалки с асинхронным двигателем» («ЭСКаДа») / А.М. Зюзев, **В.П. Метельков**, А.С. Попов; патентообладатель ФГАО ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». – № 2003611978; заявл. 16.09.2003; зарегистр. 12.11.2003 г.

37. Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614646 РФ. Термодинамическая модель асинхронного двигателя для продолжительного режима работы / А.М. Зюзев, **В.П. Метельков**; патентообладатель ФГАО ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». – № 2015610304; заявл. 06.03.2015; зарегистр. 22.04.2015 г.

38. Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614708 РФ. Термодинамическая модель асинхронного двигателя для повторно-кратковременного режима работы / А.М. Зюзев, **В.П. Метельков**; патентообладатель ФГАО ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». – № 2015611527; заявл. 10.03.2015; зарегистр. 24.04.2015 г.

39. Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661800 РФ. Термодинамическая модель асинхронного двигателя с учетом температурного изменения параметров / А.М. Зюзев, **В.П. Метельков**; патентообладатель ФГАО ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». – № 2015618602; заявл. 17.09.2015; зарегистр. 09.11.2015 г.

40. Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015663156 РФ. Модель асинхронного электропривода с тиристорным преобразователем напряжения в Matlab/Simulink / А.М. Зюзев, А.В. Костылев, **В.П. Метельков**, Д.П. Степанюк; патентообладатель ФГАО ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». – № 2015660167; заявл. 27.10.2015; зарегистр. 11.12.2015 г.

41. Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018614391 РФ. Термодинамическая модель асинхронного двигателя с радиальными каналами для исследования пусковых режимов (TDM-AM) / **В.П. Метельков**, А.М. Зюзев; патентообладатель ФГАО ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». – № 2018614391; заявл. 03.05.2018; зарегистр. 20.06.2018 г.

Другие основные публикации:

42. **Метельков, В.П.** Оценка величины тепловой проводимости медь-сталь обмотки статора асинхронного двигателя / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Межвузовский сборник научных трудов «Электромеханика, электротехнические комплексы и системы». – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2010. – С. 33–39. 0,28 п. л. / 0,14 п. л.

43. **Метельков, В.П.** Оценка нагрева обмотки статора асинхронного двигателя в электроприводе с периодическим характером нагружения / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. тр. – Вып. 18. – Магнитогорск: МГТУ, 2010. – С. 80–86. 0,26 п. л. / 0,13 п. л.

44. **Метельков, В.П.** Термодинамическая модель статора асинхронного двигателя с учетом нагрева лобовых частей обмотки / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. тр. – Вып. 18. – Магнитогорск: МГТУ, 2010. – С. 129–137. 0,34 п. л. / 0,17 п. л.

45. **Метельков, В.П.** Ограничения по нагреву и просадке напряжения в пусковых режимах асинхронных электроприводов / А.М. Зюзев, В.П. Метельков, Д.П. Степанюк // Материалы международной научно-технической конференции «Электротехнические комплексы и системы». Комсомольск-на-Амуре, 21-22 октября 2010 г.: В 5 томах. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО «КнАГТУ», 2010. – Т. 3. – С. 67–70. 0,16 п. л. / 0,08 п. л.

46. **Метельков, В.П.** Расчет параметров термодинамической модели асинхронного двигателя для электроприводов с интенсивными пусковыми режимами / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Материалы международной научно-технической конференции «Электротехнические комплексы и системы». Комсомольск-на-Амуре, 21-22 октября 2010 г.: В 5 томах. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО «КнАГТУ», 2010. – Т. 3. – С. 71–74. 0,16 п. л. / 0,10 п. л.

47. **Метельков, В.П.** Расчет тепловых проводимостей термодинамической модели асинхронного двигателя для электропривода с интенсивными процессами нагрева / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Материалы I Международной научно-практической конференции «Современная наука: теория и практика». Том первый. Естественные и технические науки. Ставрополь, 15 ноября 2010 г. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2010. – С. 112–115. 0,20 п. л. / 0,10 п. л.

48. **Метельков, В.П.** Идентификация параметров двухмассовой термодинамической модели асинхронного электродвигателя на основе экспериментальных данных / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: сборник научных трудов IV Международной научно-технической конференции. Екатеринбург, 15–18 марта 2011 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – С. 299–304. 0,26 п. л. / 0,13 п. л.

49. **Метельков, В.П.** Эквивалентирование режимов нагревания асинхронного двигателя по остаточному ресурсу изоляции / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: сборник научных трудов IV Международной научно-технической конференции. Екатеринбург, 15–18 марта 2011 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – С. 305–308. 0,22 п. л. / 0,11 п. л.

50. **Метельков, В.П.** Оценка ресурса изоляции асинхронных двигателей в электроприводах с циклическим характером нагружения / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Состояние и перспективы развития электротехнологии: сборник научных трудов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения). Иваново, 1–3 июня 2011 г. –Т. 3.: Электротехника. – Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный университет имени В. И. Ленина», 2011. – С. 97–100. 0,12 п. л. / 0,06 п. л.

51. **Метельков, В.П.** Влияние ограничений по нагреву и просадке напряжения на пусковые режимы асинхронных электроприводов / А.М. Зюзев, В.П. Метельков, Д.П. Степанюк // Электротехнические комплексы и системы: межвузовский научный сборник; Уфимский государственный авиационный технический университет. – Уфа: УГАТУ, 2011. – С. 172–177. 0,22 п. л. / 0,11 п. л.

52. **Метельков, В.П.** Исследование теплового ресурса приводного двигателя штанговой глубинной насосной установки / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Электромеханические преобразователи энергии: материалы V Юбилейной международной научно-технической конференции, посвященной памяти Г.А. Сипайлова. Томск, 12-14 Октября 2011 г. – Томск: Изд-во Томск. политех. ун-та, 2011. – С. 35–39. 0,16 п. л. / 0,08 п. л.

53. **Метельков, В.П.** Анализ пусковых режимов асинхронного электропривода с учетом ограничений по нагреву и влияния на сеть / А.М. Зюзев, В.П. Метельков, Д.П. Степанюк // Труды Международной пятнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» – Екатеринбург, 12–16 марта 2012. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 179–182. 0,24 п. л. / 0,12 п. л.

54. **Метельков, В.П.** Использование термодинамических моделей для проверки асинхронного двигателя по нагреванию / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Труды Международной пятнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» – Екатеринбург, 12–16 марта 2012. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 183–186. 0,26 п. л. / 0,15 п. л.

55. **Метельков, В.П.** Термодинамические модели асинхронного двигателя в задачах электропривода / А.М. Зюзев, В.П. Метельков, Д.П. Степанюк // Труды VII Международной (VIII Всероссийской) научно-технической конференции по

автоматизированному электроприводу: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина» – Иваново, 2–4 октября 2012. – Иваново, 2012. – С. 231–235. 0,30 п. л. / 0,15 п. л.

56. **Метельков, В.П.** Система «ТПН-АД» с регулятором остаточного напряжения на шинах сети / А.М. Зюзев, А.В. Костылев, Д.П. Степанюк, В.П. Метельков // Электротехнические системы и комплексы: Сб. науч. трудов. Вып.20. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. – С. 58–63. 0,20 п. л. / 0,10 п. л.

57. **Метельков, В.П.** Определение параметров двухмассовой тепловой схемы асинхронного электродвигателя по результатам эксперимента / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Электротехніка та електроенергетика. – 2012. – № 2. – С. 37–41. 0,30 п. л. / 0,15 п. л.

58. **Метельков, В.П.** Расчет параметров двухмассовой термодинамической модели асинхронного двигателя / А.М. Зюзев, В.П. Метельков, В.А. Максимова // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. – 2012. – № 1. – С. 121–131. 0,32 п. л. / 0,16 п. л.

59. **Метельков, В.П.** Определение параметров термодинамической модели асинхронного двигателя для повторно-кратковременного режима работы / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – 2013. – № 36 (1009). – С. 330–331. 0,16 п. л. / 0,08 п. л.

60. **Метельков, В.П.** Нагрев асинхронного двигателя при случайном характере нагрузки / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. – 2013. – № 1. – С. 50–56. 0,20 п. л. / 0,10 п. л.

61. **Метельков, В.П.** Исследование возможностей энергосбережения в электроприводе стружкоуборочного конвейера / М.Ю. Бородин, В.П. Метельков // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий. 3-я Международная конференция АПЭЭТ-2014 – Екатеринбург, 17–20 марта 2014. Сб. научных трудов. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014. – С. 164–166. 0,27 п. л. / 0,14 п. л.

62. **Метельков, В.П.** Анализ границ применимости метода средних потерь для асинхронных двигателей / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 – Саранск, 7–9 октября 2014: в 2 т., Т. 1. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 100–103. 0,28 п. л. / 0,15 п. л.

63. **Метельков, В.П.** Энергосберегающий электропривод стружкоуборочного конвейера / М.Ю. Бородин, В.П. Метельков, П.В. Молчанов // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. – 2015. – № 1. – С. 53–61. 0,28 п. л. / 0,15 п. л.

64. **Метельков, В.П.** Моделирование систем ТПН-АД в среде ANSYS / А.М. Зюзев, В.П. Метельков, Д.П. Степанюк, М.В. Бубнов // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. Материалы IX Всероссийской (с международным участием) научно-технической

интернет-конференции. Пермь, 1–30 июня 2015 г. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2015. – С. 144–153. 0,17 п. л. / 0,09 п. л.

65. **Метельков, В.П.** Оценка необходимости учета температурной зависимости параметров термодинамических моделей асинхронных двигателей / А.М. Зюзев, В.П. Метельков // Электроприводы переменного тока: Труды международной шестнадцатой научно-технической конференции – Екатеринбург, 05–09 октября 2015. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», 2015. – С. 59–62. 0,29 п. л. / 0,15 п. л.

66. **Метельков, В.П.** К оценке влияния колебаний температуры на долговечность изоляции обмотки статора асинхронных двигателей в случайных режимах нагружения / И.Я. Браславский, В.П. Метельков, Д.В. Есаулкова, А.В. Костылев // Электроприводы переменного тока: Труды международной шестнадцатой научно-технической конференции – Екатеринбург, 05–09 октября 2015. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», 2015. – С. 67–70. 0,27 п. л. / 0,14 п. л.

67. **Метельков, В.П.** Комплексная модель асинхронного электропривода в среде ANSYS / А.М. Зюзев, В.П. Метельков, М.В. Бубнов, А.Е. Клявлин // Электроприводы переменного тока: Труды международной шестнадцатой научно-технической конференции. Екатеринбург, 05–09 октября 2015 г. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», 2015. – С. 115–118. 0,22 п. л. / 0,11 п. л.

68. **Метельков, В.П.** Анализ пусковых режимов асинхронного электропривода нагнетателя РС 4А-3N-95 / А.М. Зюзев, В.П. Метельков, Д.А. Яшин // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. – 2016. – Т. 1. – С. 136–143. 0,22 п. л. / 0,12 п. л.

69. **Метельков, В.П.** Разработка научных принципов проектирования энергоэффективных систем переменного тока с цифровым управлением и программных средств для их исследования и реализации. Разработка алгоритмов защиты двигателя от перегрева по току статора: отчет НИОКР № 01201264213 / А.М. Зюзев, В.П. Метельков. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – Регистрационный номер сведений о результатах НИОКТР: АААА-Б17-217122820003-4. – Дата регистрации: 28.12.2017. – 61 с. 2,15 п. л. / 1,50 п. л.

Подписано в печать ____ . _____ 2020. Формат 60×841/16.

Усл. печ. л. 2,0 Тираж 100 экз. Заказ №. _____

Отпечатано в Типографии «А-Принт»
620049, г. Екатеринбург, пер. Лобачевского 1.