

## ОТЗЫВ

официального оппонента по диссертационной работе Метелькова Владимира Павловича «Развитие теории и разработка методов оценки теплового состояния электродвигателей при проектировании и эксплуатации асинхронных электроприводов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты» и 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

### 1. Актуальность темы диссертационного исследования.

Актуальность темы диссертационного исследования Метелькова Владимира Павловича обусловлена тем, что асинхронные двигатели (АД) находят все большее применение в промышленности, вытесняя двигатели постоянного тока из сфер, где они традиционно применялись. По совокупной установленной мощности и в количественном отношении АД всегда были преобладающими, благодаря простоте конструкции и отсутствию особых требований по техническому обслуживанию в процессе эксплуатации. Именно последнее привело к тому, что электротехнический персонал уделял недостаточное внимание повышению культуры обслуживания массовых асинхронных электроприводов, особенно нерегулируемых. Об этом свидетельствуют значительно превышающие нормативы, высокий процент выхода из строя двигателей данного типа. В отдельных отраслях эксплуатационный ресурс меньше нормативного в 2-3 раза. Развитие способов диагностирования и современное техническое оснащения электроприводов средствами диагностирования позволяет выявить различные признаки развития тех или иных дефектов еще на ранней стадии. Однако причины появления дефектов, особенно связанных с влиянием температурного состояния обмоток статора и ротора на долговечность изоляции, не всегда в полной мере согласуются с нагревом обмоток в процессе эксплуатации. В этой связи важной проблемой, тесно связанной с вопросами повышения ресурсоэффективности, является проблема оценки теплового состояния АД на всех стадиях жизненного цикла асинхронных электроприводов, особенно на стадиях проектирования и эксплуатации. Только при таком подходе в конечном итоге может достигаться основная цель – обеспечение отработки нормативного срока эксплуатации АД.

Правильная оценка теплового состояния на стадиях проектирования и эксплуатации является весьма сложной научно-технической проблемой, требующей решения широкого спектра взаимосвязанных вопросов с учетом тесной связи теплового состояния электродвигателя с режимами его работы и научно-обоснованных оценок его влияния на ресурс изоляции. В этой связи соискателем достаточно обоснованно поставлен широкий круг вопросов,

которые раньше вообще не ставились и не решались. Среди них следует выделить:

- оценку влияния температурных зависимостей параметров двигателя на свойства термодинамических моделей (ТДМ) АД;

- преодоление проблемы расчета параметров простейших ТДМ в условиях ограниченной информации о двигателе;

- проблемы учета нелинейного характера связи скорости термического старения изоляции с температурой для оценки теплового состояния двигателя и его эксплуатационного ресурса;

- задачи разработки простых в реализации способов диагностики дефектов изоляции на ранней стадии возникновения.

В целом следует отметить, что поставленная цель диссертационной работы и широкий спектр направлений исследований сформулированных в рамках постановки задач являются актуальными.

## **2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

2.1. На основе анализа существующего состояния парка АД на промышленных предприятиях в стране, причин выхода их из строя, установлено, что значительная доля возникающих отказов при эксплуатации приходится на выход из строя обмоток статора. Надежность и долговечность изоляции статорной обмотки, как известно, зависит от теплового состояния АД в процессе эксплуатации. В качестве важной проблемы соискателем в этой связи обоснована необходимость научно обоснованной оценки теплового состояния АД (как на стадии проектирования ЭП, так и на стадии его эксплуатации) с точки зрения обеспечения отработки им нормативного срока службы.

2.2. В спектре взаимосвязанных вопросов, наглядно представленных на рис. В.1 в диссертации и на рис.1 в автореферате, обозначены исходные посылки для постановки комплекса задач по диссертационной работе, последовательность и пути их решения. Все позиции, представленные на этом рисунке, являются вполне обоснованными, что позволяет сделать заключение об обоснованности основных позиций диссертационной работы.

2.3. В работе обоснована необходимость разработки методов оценки теплового состояния электродвигателя с учетом влияния процессов нагрева его в различных режимах на термический ресурс изоляции. Совокупность разрабатываемых методов могут обеспечить более обоснованную оценку теплового состояния двигателя, чем известные прямые методы на основе усреднения температуры обмотки, или классические косвенные методы средних потерь и эквивалентных величин.

2.4. Обобщенное математическое описание термодинамической модели электрической машины для произвольного количества узлов и охлаждающих сред, разработанное соискателем, базируется на строгом математическом

описании и в первой главе диссертации данная модель была всесторонне исследована, что позволило количественно оценить влияния различных факторов. В частности, был проведен анализ влияния температурных зависимостей теплоемкостей и тепловых проводимостей ТДМ, а также условия, при которых их необходимо учитывать.

2.5. Обоснование пригодности двухмассовой ТДМ проведено достаточно корректно. При этом на основе анализа наиболее широко применяемых термодинамических моделей сформулированы рекомендации по компоновке узлов для упрощенных ТДМ, с выделением в качестве отдельного узла обмотки статора и получено математическое описание двухмассовой ТДМ и проведен его анализ. Все принятые допущения являются обоснованными.

2.6. Полученные соотношения и системы уравнений рассмотрены в двух вариантах с использованием и без использования постоянных времени ТДМ были, что позволило применять различные варианты исходных данных о двигателе и обосновать экспериментальным путем целесообразность использования наибольшей постоянной времени.

2.7. Предложенный подход к эквивалентированию тепловых режимов и оценке теплового состояния электродвигателя, основанный на вычислении расхода термического ресурса изоляции, подкреплен разработанными методиками оценки теплового состояния на основе вычисления расхода термического ресурса и применения в классических методах проверки двигателя по нагреву специальных поправочных коэффициентов. Для этих коэффициентов были получены аналитические выражения связи с коэффициентом ускорения расхода термического ресурса изоляции при колебаниях температуры статорной обмотки.

2.7. Ресурсный подход в разработке эффективной методики оценки теплового состояния АД на этапах проектирования и эксплуатации в различных режимах работы электропривода является наиболее рациональным, так как опирается на учет реально существующих процессов старения изоляции и ускорения расхода термического ресурса в условиях колебания температуры от среднего значения.

2.8. Возможности аналитической оценки теплового состояния АД при стохастическом характере нагрузки на этапе проектирования электропривода опираются на аппроксимирующие выражения для расхода термического ресурса изоляции, в которых учтена нелинейность связи скорости старения изоляции и температуры обмотки.

2.9. Предложенные алгоритмы работы системы тепловой защиты базируются на реально измеренных значениях тока статора и скорости вращения АД, а подход к мониторингу и прогнозированию состояния изоляции на измерении эффективных значений емкостных токов утечки. В работе доказана возможность использования предложенного алгоритма работы системы прогнозирования состояния изоляции.

2.10. Отдельно были исследованы подходы к решению проблем оценки

теплового состояния короткозамкнутого ротора. При этом использован строгий математический аппарат с использованием уравнения Фредгольма второго рода. Его аналитическое решение, представленное в виде компактного выражения, дает расчетные результаты, которые хорошо сопоставляются с результатами численного моделирования и не противоречат ранее полученным результатам исследований пусковых режимов в теории и практике асинхронного электропривода.

*Таким образом, все сформулированные выводы и рекомендации являются теоретически обоснованными и экспериментально проверенными. Отдельные результаты работы подкреплены численными показателями, что подчеркивает их значимость в достижении поставленной цели.*

### **3. Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций.**

Достоверность результатов исследований, разработанных рекомендаций и выводов, изложенных в материалах диссертации, и в опубликованных работах, определяется корректностью постановок задач, обоснованностью принятых допущений, использованием апробированных математических и численных методов. Основные теоретические выводы получены соискателем, опираясь на методы теории электропривода переменного тока, электрических машин, а также достаточной сходимостью результатов расчетов, моделирования и экспериментальных исследований на физическом макете.

Новизна научных положений, полученных выводов и рекомендаций обусловлена:

- в первую очередь постановкой и решением задач в отношении создания новой методологии оценки теплового состояния электродвигателя на этапах конструирования электропривода и его эксплуатации;
- разработкой методов и технических решений для эффективной оценки теплового состояния асинхронных двигателей на этапах проектирования и эксплуатации электропривода, направленных на повышение их надежности и долговечности;
- разработкой научно обоснованных решений для повышения ресурсоэффективности асинхронных электроприводов за счет рационального выбора их параметров на стадии проектирования.

Характеризуя новизну основных позиций диссертационной работы целесообразно отметить следующее:

3.1. Установление взаимосвязи вопросов, вытекающих из необходимости оценки допустимости режимов работы двигателя на этапах конструирования электропривода дает наглядно отражает новую методологию комплексного подхода к оценке теплового состояния АД на этапах проектирования и эксплуатации электропривода.

3.2. Обобщенное математическое описание ТДМ АД с учетом

требований к решению задач электропривода отличается тем, что учитывает произвольное количество узлов и охлаждающих сред. Такой подход делает данную ТД модель универсальной и может использоваться для обоснованного уровня сложности в решении конкретных задач в зависимости от режима работы электропривода. В рамках этой позиции получено 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, в которых реализованы термодинамические модели АД для исследования различных режимов.

3.3. Результаты анализа математического описания взаимосвязей параметров двухмассовой модели, полученные аналитические соотношения для расчета параметров этой модели, а также методика применения экспериментальных данных для расчета параметров модели являются новыми, так как они получены с использованием нового подхода, реализованного на основе обобщенного математического описания ТДМ.

3.4. В разработанной методике оценки теплового состояния АД на этапе проектирования и эксплуатации на основе вычисления расхода термического ресурса изоляции впервые предложено учитывать существование нелинейного характера зависимости между скоростью старения изоляции и её температурой. Учет этой особенности способствует повышению эффективности предложенной методики.

3.5. Создание методик вычисления расхода термического ресурса позволило разработать новые принципы и подходы к построению системы мониторинга теплового состояния АД, к прогнозированию состояния изоляции обмотки статора, новые данные и аналитические выражения для эффективной оценки остаточного ресурса изоляции.

3.6. 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, что позволило создать комплексную модель, позволяющую воспроизводить и визуализировать процессы нагрева элементов двигателя, которые не могут быть исследованы экспериментально.

В целом необходимо отметить также новизну полученных аналитических выражений, результатов аналитических исследований, моделирования и физического эксперимента.

*Безусловно, все позиции, представленные в диссертации в разделе «Заключение» являются новыми, так как в них приведены количественные и качественные оценки комплексного исследования по теме диссертации. Новизна исследований подкреплена также патентами и свидетельствами о государственной регистрации программ на ЭВМ, значительным объемом публикаций по теме диссертации в рецензируемых журналах и журналах входящих в систему цитирования Scopus.*

#### 4. Соответствие диссертации и автореферата требованиям Положения о присуждении ученых степеней.

В данной диссертационной работе на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты» и 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» Метельковым В.П. на основании выполненных исследований разработаны теоретические положения, которые в совокупности можно квалифицировать как решение научной проблемы, связанной с развитием теории и разработкой методов оценки теплового состояния электродвигателей при проектировании и эксплуатации асинхронных электроприводов, имеющее важное хозяйственное значение в промышленной сфере.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в следующих позициях:

4.1. Сформулированы концептуальные положения комплексного подхода к разработке 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.

4.2. Разработано обобщенное математическое описание ТДМ АД для произвольного количества узлов и охлаждающих сред, а также обоснование рационального уровня сложности структуры ТДМ АД для задач электропривода, включая математическое описание взаимосвязей параметров двухмассовой ТДМ АД, позволяющее аналитическим путем или численными методами определить значения этих параметров при различном составе исходных данных о двигателе и методика оценки теплового состояния АД на этапе проектирования электропривода и в ходе его эксплуатации на основе вычисления расхода термического ресурса изоляции обмотки с учетом нелинейного характера зависимости между скоростью термического старения изоляции обмотки и ее температурой, что повышает ее эффективность.

4.3. Разработаны и теоретически обоснованы подходы к эквивалентированию тепловых режимов и оценке теплового состояния электродвигателя, основанные на установлении соотношений для вычисления расхода термического ресурса изоляции и методика использования прямой оценки теплового состояния АД, а так же к прогнозированию состояния изоляции АД и оценке остаточного ресурса изоляции.

4.4. Получены аналитическое решение уравнения Фредгольма второго рода для греющихся элементов ротора и аналитические выражения для оценки теплового состояния АД в пусковых режимах, а также номограммы

для определения значения коэффициента ускорения расхода термического ресурса изоляции.

Практическая значимость заключается в разработке вариантов реализации систем защиты и мониторинга теплового состояния электродвигателя, обеспечивающих более надежный контроль теплового состояния электропривода в ходе эксплуатации, что позволяет снизить вероятность преждевременного выхода двигателя из строя и обеспечить отработку нормативного срока службы. Следует также отметить, что созданы предпосылки, позволяющие на этапе проектирования избежать нерациональных вариантов компоновки узлов энергосилового канала электропривода, приводящих к перегреву обмоток с сокращением межремонтных интервалов и сроков службы машины. Внедрение полученных результатов позволяет наиболее полно выявить причины возникновения термических перегрузок на этапе эксплуатации в пусковых режимах и обеспечить их снижение.

Основное содержание диссертации опубликовано в 69 научных работах, в числе которых 20 научных статей в рецензируемых журналах, рекомендованных перечнем ВАК РФ, 11 научных публикаций входящих в систему цитирования Scopus, 3 патента на полезные модели, 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и 28 работ опубликованных в сборниках научных трудов и трудов научных конференций. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались 15 Международных и Всероссийских научных конференциях.

Содержание диссертации соответствует паспорту научных специальностей:

- **05.09.01 Электромеханика и электрические аппараты** – П. 5. Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов;

- **05.09.03 Электротехнические комплексы и системы** – П. 1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, *изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем*; П. 2. Обоснование совокупности *технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев* оценки принимаемых решений *в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем*; П. 3. Разработка, *структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация*, а также разработка алгоритмов эффективного управления; П.4. Исследование *работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах*, при

разнообразных внешних воздействиях; П. 5. *Разработка безопасной и эффективной эксплуатации, утилизации и ликвидации электротехнических комплексов и систем после выработки ими положенного ресурса.*

В автореферате в достаточной степени изложены основные положения диссертационной работы, что позволяет ознакомиться с содержанием и результатами работы, оценить их теоретическую и практическую значимость.

Акты об использовании и внедрении результатов диссертационной работы приведены в Приложении 4 диссертации.

## **5. Дискуссионные положения и замечания:**

5.1. При исследовании нагрева двигателя АДЧР-1600 в пусковых режимах использовалась термодинамическая модель на основе тепловой схемы с большим количеством узлов. Не проще ли было бы в этом случае использовать подход к моделированию на основе метода конечных элементов, что позволило бы обеспечить более точные результаты, тем более, что в распоряжении был чертеж ротора машины с указанием размеров?

5.2. Отслеживание динамики развития неисправностей и прогнозирование остаточного ресурса электродвигателя позволяет перейти к системе планово-предупредительных ремонтов в зависимости от его реального состояния. В работе рассмотрены способы мониторинга остаточного ресурса изоляции обмотки статора. Однако подшипники и роторная обмотка также вносят заметный вклад в статистику выходов асинхронных двигателей из строя, но вопросы мониторинга состояния этих элементов двигателя в работе не затронуты.

5.3. В постановке задач диссертационной работы отмечается «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». Нужно отметить, что при проектировании электропривода также и условия электромагнитной совместимости с питающей сетью во многом определяют выбор вида и параметров мощного регулируемого электропривода переменного тока. В ряде случаев эти требования влияют и на выбор пускового устройства. Также существенно влияние на электропривод реактивной мощности, которую он же и потребляет, так как она приводит к повышению потерь в сети, что, в свою очередь, приводит к изменению напряжения в узле нагрузки.

5.4. В диссертации на рис.4.29 и 4.30 (стр.215) приведены усредненные кривые нагрева для двигателей кластеров с изоляцией класса В (цифры на графиках соответствуют номеру кластера) и усредненные кривые нагрева для двигателей кластеров с изоляцией класса F. Анализируя кривые, трудно увидеть разницу между ними. По тексту, начиная со стр. 211, отсутствуют подробные комментарии. Прошу дать пояснения.



5.5. Существующие методики оценки пусковых режимов асинхронных электроприводов ориентированы преимущественно на соблюдение условий допустимого нагрева двигателя. Вместе с тем, различные способы пуска неравнозначны также и по степени ограничения колебательной составляющей момента и, соответственно, по степени снижения негативного влияния переходных пусковых процессов. В главе 6 диссертации получены выражения для расчета допустимого присоединенного момента инерции при параметрах механической характеристики, отличающихся от стандартной, исходя из условия нагрева роторной обмотке за время пуска, но не рассмотрен учет негативного влияния колебательной составляющей переходного электромагнитного момента

*Следует отметить, что представленные замечания не снижают ценность диссертационной работы, так как ее результаты имеют серьезную научную и практическую значимость.*

## **6. Заключение**

6.1. Диссертационная работа Метелькова В.П. «Развитие теории и разработка методов оценки теплового состояния электродвигателей при проектировании и эксплуатации асинхронных электроприводов», является законченной научно-исследовательской квалификационной работой, в ней разработаны теоретические положения, которые в совокупности можно квалифицировать как решение научной проблемы, связанной с развитием теории и разработкой методов оценки теплового состояния электродвигателей при проектировании и эксплуатации асинхронных электроприводов, имеющее важное хозяйственное значение в промышленной сфере.

6.2. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне. Соискателем выполнен значительный объем работы, начиная с известных подходов к решению задач в этой сфере, проведения теоретического обоснования по каждой позиции, сформулированной в круге задач, поставленных по диссертационной работе и положений, выносимых на защиту, заканчивая научным обобщением результатов теоретических и экспериментальных исследований. Содержание диссертации соответствует её названию и научной специальности. Текст диссертации изложен ясным, технически грамотным языком, графическая часть хорошо оформлена, положения и выводы по главам, а также общее заключение четко аргументированы.

6.3. Основные положения диссертации в достаточной мере отражены в научных трудах соискателя. В работах, опубликованных в соавторстве, определен личный вклад соискателя, позволяющий сделать вывод о том, что в них отражены результаты исследований соискателя. Всего по теме диссертации опубликовано 69 научных работ из них 20 – в изданиях из

перечня ВАК и 11 в системе цитирования Scopus, получено 10 свидетельств интеллектуальной собственности.

6.4. Автореферат достаточно подробно отражает основные положения диссертационной работы и её содержание. Следует также отметить высокое качество представления графической части и рисунков.

6.5. На основании изложенного считаю, что диссертационная работа Метелькова Владимира Павловича является завершённой научно-квалификационной работой, удовлетворяющей требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, которым должны отвечать диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты» и 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы», а её автор Метельков Владимир Павлович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по названным выше специальностям.

Официальный оппонент:  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры автоматизированного  
электропривода и мехатроники  
ФГБОУ ВО  
«Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова»

  
Сарваров  
Анвар Сабулханович

26. марта .2020 г.

455000, Челябинская область, г. Магнитогорск, Проф. Ленина, 38  
Тел.: (912) 300-01-27  
E-mail: anvar@magtu.ru



**ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ**  
Начальник отдела делопроизводства  
ФГБОУ ВО «МГУ им. Г.И. Носова»  
  
Д.Г. Семенова

Подпись Сарваров а Анвара Сабулхановича заверяю: