

ОТЗЫВ

официального оппонента Захарова Алексея Вадимовича на диссертацию Метелькова Владимира Павловича «Развитие теории и разработка методов оценки теплового состояния электродвигателей при проектировании и эксплуатации асинхронных электроприводов», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.09.01 – электромеханика и электрические аппараты, 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы

Актуальность темы диссертации

Частотно-регулируемый электропривод с асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором получил массовое внедрение в промышленности и на транспорте, при этом, значительная часть асинхронных машин применяемых в частотно-регулируемом электроприводе не была разработана с использованием особенностей их применения в конкретном технологическом агрегате, а была выбрана из номенклатуры общепромышленных электродвигателей. Применяемый подход экономически оправдан и закреплен документом ГОСТ Р МЭК/ТС 60034-17-2009 «Машины электрические вращающиеся. Часть 17. Руководство по применению асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при питании от преобразователей». При этом надежность работы электрической машины существенно зависит от режима ее эксплуатации, в том числе, от тепловой нагрузки на обмотку статора.

В представленной к защите диссертационной работе предлагается концепция использования термодинамических математических моделей асинхронного двигателя в задачах электропривода. Для этого автор работы – Метельков Владимир Павлович предлагает подход для разработки и определения параметров термодинамических моделей с различной степенью детализации. Кроме того, автор вводит понятие термодинамического ресурса изоляции обмотки статора асинхронного двигателя, сбережение которого, должно повысить надежность эксплуатации электрической машины в частотно-регулируемом электроприводе. Значительное внимание в работе уделено мониторингу термического ресурса изоляции средствами электропривода, для чего разработаны соответствующие модели и средства их реализации в системах управления частотно-регулируемого электропривода.

Актуальность работы также определяется тем фактом, что возможности современного электропривода переменного тока позволяют реализовывать достаточно сложные режимы регулирования частоты вращения и момента, необходимые для выполнения технологического процесса в приводимом агрегате. При этом электрическая машина всегда находится в подчиненном положении, а ее режимы определены с одной стороны параметрами питания, с другой стороны, нагрузкой. Поэтому разработка подходов по рациональному выбору электродвигателей, проектирование и реализация новых систем мониторинга состояния критических элементов машины, ориентированная на исключение опасных перегревов обмотки статора – актуальны и практически востребованы.

Цель диссертации – 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, соответствует паспорту научной специальности 05.09.03 «электротехнические комплексы и системы», а также паспорту научной специальности 05.09.01 «электромеханика и электрические аппараты».

Научную новизну результатов диссертационной работы составляют:

1. Обобщенное описание термодинамической модели асинхронного двигателя с учетом специфики использования в задачах электропривода отличающееся тем, что учитывает произвольное количество узлов и охлаждающих сред и имеет рациональный уровень подробности для решения задач электропривода.

2. Математическое описание взаимосвязей параметров двухмассовой термодинамической модели асинхронного двигателя и аналитические соотношения для расчета параметров этой модели на основе минимального объема исходных данных. Методика расчета параметров двухмассовой термодинамической модели асинхронного двигателя на основе экспериментальных данных.

3. Методика оценки теплового состояния асинхронного двигателя, ориентированная на применение при проектировании и эксплуатации электропривода, использующая предложенную концепцию расхода термического ресурса изоляции обмотки, учитывающая нелинейный

характер зависимости между скоростью термического старения изоляции обмотки и ее температурой.

4. Структура системы тепловой защиты асинхронных двигателей, использующая термодинамическую модель с разделением быстрого и медленного каналов, что позволяет упростить решение задачи определения начальных условий для математической модели при возобновлении работы после отключения привода.

5. Алгоритм построения системы мониторинга теплового состояния асинхронного двигателя на основе усреднения скорости старения изоляции, эффективность которого повышена за счет учета влияния колебаний температуры на скорость термического старения изоляции.

6. Алгоритм мониторинга состояния изоляции обмотки статора асинхронного двигателя в ходе эксплуатации электропривода на основе использования информации об эффективном значении емкостных токов утечки, входные данные для которого определяются на основе эксперимента в процессе эксплуатации.

7. Формулы для оценки теплового состояния асинхронного двигателя в пусковых режимах, позволяющие выполнить согласование параметров электромеханического комплекса с учетом особенностей системы электропривода при минимальном наборе входных параметров.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов диссертации обеспечены корректным применением положений теоретической электротехники, электромеханики, теории автоматического управления, теории электропривода, использованием современных методов и программ математического моделирования (MATLAB, Simulink, Maxwell), а также экспериментальными исследованиями в лабораториях ФГБОУ ВО УрФУ имени первого Президента РФ Б.Н. Ельцина. Выданные патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, связанные с диссертационной работой, также вносят вклад в обеспечение достоверности, обоснованности и корректности диссертационной работы.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Предложенные варианты термодинамической модели асинхронного двигателя помогают снизить сложность задания параметров электродвигателя, ускорить определение начальных условий, что позволяет расширить области применения термодинамических моделей в системах контроля теплового состояния асинхронного двигателя и системах мониторинга остаточного ресурса изоляции обмотки.

2. Предложенный подход к эквивалентированию тепловых режимов по расходу термического ресурса изоляции позволяет получить интегральную оценку тепловой нагрузки на обмотку статора асинхронного двигателя и на основе этой оценки снизить неоправданно завышенный запас по мощности машины, в случае если он имеется, тем самым повысив эффективность использования активной части машины как ресурса электропривода.

3. Предложенные схемы и алгоритмы систем защиты и мониторинга теплового состояния электродвигателя позволяют увеличить надежность контроля остаточного ресурса обмотки статора в ходе эксплуатации электропривода, что позволяет снизить вероятность преждевременного выхода его из строя.

4. Разработанные методики оценки теплового состояния обмоток асинхронного двигателя при пуске помогают снизить вероятность критических ошибок проектирования электроприводов с высокими динамическими нагрузками, а следовательно, сократить сроки пусконаладочных работ и увеличить межремонтные интервалы.

Результаты и выводы диссертационного исследования рекомендуются использовать специалистам в области электропривода, а также организациям соответствующего технического профиля, осуществляющим разработки и исследования в области частотно-регулируемого электропривода с асинхронными электродвигателями и техническим специалистам, проводящим подбор асинхронных электродвигателей для использования в частотно-регулируемом электроприводе, работающем с переменной производительностью в режимах работы S2, S3, S9, S10 по ГОСТ Р 52776-2007 (МЭК 60034-1-2004).

Диссертация представлена текстом на 437 страницах, состоит из введения, заключения, шести глав и четырех приложений. Список литературы включает 329 источников.

Во **введении** показана актуальность работы, научная новизна, практическая ценность, сформулирована цель исследования. Первая глава посвящена разработке обобщенного математического описания термодинамической модели электрической машины, ориентированной на использование в задачах электропривода. **Во второй главе** автор исследует, находит и обосновывает рациональный уровень подробности и необходимую структуру термодинамической модели асинхронного двигателя

с короткозамкнутым ротором, необходимую для решения задач надежности электропривода, анализирует полученное математическое описание взаимосвязи параметров двухмассовой термодинамической модели асинхронного двигателя и выводит аналитические соотношения, необходимые для расчета параметров этой модели. **Третья глава** работы посвящена анализу возможностей привлечения и использования дополнительной информации о конструктивных особенностях асинхронного двигателя с целью уточнения параметров двухмассовой термодинамической модели. В **четвертой главе** приведены результаты разработки эффективной методики оценки теплового состояния изоляции обмотки статора асинхронной машины на основе ресурсного подхода для различных режимов работы электропривода. **Пятая глава** посвящена исследованию контроля теплового состояния асинхронного двигателя и возможностям мониторинга расхода ресурса изоляции в ходе эксплуатации электропривода, предложена структура и алгоритм построения двухмассовой термодинамической модели для закрытого обдуваемого асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, требующая минимального объема информации для определения параметров, ориентированная на использование в системах тепловой защиты двигателя. В **шестой главе** решается задача исследования теплового состояния обмоток асинхронного двигателя при пуске и вопросы согласования параметров элементов системы электропривода. Показана важность и актуальность задачи снижения теплового воздействия на обмотку ротора при пуске крупных машин, когда ее температура может достигать высоких значений. **Заключение** обобщает результаты исследования. В **приложении** приведены номограммы для определения значения коэффициента ускорения расхода термического ресурса изоляции, акты внедрения результатов работы, а также описание патентов.

Содержание работы соответствует паспорту научной специальности 05.09.03 «электротехнические комплексы и системы» по п. 1, 3-5, а также паспорту научной специальности 05.09.01 «электромеханика и электрические аппараты» по п. 5.

Автореферат правильно отражает содержание и основные положения диссертации. Работа прошла апробацию, по результатам написано 31 статья в изданиях по перечню ВАК, получено 3 патента, 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, всего 69 публикаций. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях.

Замечания

1. Объем текста диссертации значительно превышен.

2. При расчете остаточного ресурса изоляции автор учитывает только тепловую модель старения изоляции. Влияние влажности, частичных разрядов, механической нагрузки на проводники от вибрационного и электромагнитного воздействия на старение изоляции в работе не проводится. При этом предложенная в работе система мониторинга на основе измерения токов утечки позволяет диагностировать снижение надежности изоляции обмотки статора, вызванной комплексом факторов. В связи с чем не ясно, как автор связывает между собой эти два направления оценки остаточного ресурса и по какой причине тепловой модели старения уделен значительно больший объем исследования.

3. Значительная часть исследований проведена на электродвигателях серии 4А, выпуск которых завершен более 30 лет назад. При этом концепция проектирования двигателей серии 4А существенно отличается от подходов, используемых при проектировании современных двигателей. Применяемые конструктивные решения и материалы претерпели существенные изменения, что в значительной мере повлияло на распределение причин выхода из строя электродвигателей современных серий в сравнении с устаревшими. В настоящее время, для электродвигателей до 400 кВт выход из строя переднего подшипникового узла является доминирующей неисправностью, а выход из строя обмотки статора, как правило, связан с поставкой некачественных материалов, нарушением технологии производства, ошибками проектирования или эксплуатации электрических машин. В связи со сказанным требуется разъяснить могут ли полученные в работе результаты быть применены на современных электрических машинах с учетом тенденций применения систем изоляции обмоток статора с классом нагревостойкости 200, 220°C.

4. В параграфе 2.1 при рассмотрении схем замещения систем охлаждения автор приводит название способов охлаждения по ГОСТ 20459-87, утратившем силу в РФ, в тоже время, требования по обозначению способа охлаждения регламентированные в ГОСТ Р МЭК 60034-6-2012 «Машины электрические вращающиеся. Часть 6. Методы охлаждения (Код IC)» проигнорированы.

5. Там же, на рис. 2.1 (б-е) приводятся тепловые схемы для некоторых способов охлаждения, которые в отсутствии подробного рассмотрения конструкции электрического двигателя, не воспринимаются однозначно.

6. Значения, приведенные в таблице 3.2 для расчета длины вылета лобовой части, занижены и вкуче с игнорированием длины прямого участка вылета обмотки дают ошибку около 20%.

7. Не ясна ценность информации, приведенной в таблице 3.4, содержащей информацию о параметрах аксиальных вентиляционных каналов серии 4А, особенно с учетом того, что конструктивные решения в области вентиляции роторов, используемые в электродвигателях с высотой оси вращения 250-315 серии 4А в последующей практике проектирования серий отечественных двигателей не применялись. В связи с чем данные о аксиальных каналах ротора электродвигателей с $2p=2$ современными специалистами в области электрических машин воспринимается как ошибка проектирования.

8. Назначение исследований, приведенных в главе 6 работы, требуют разъяснений.

Режимы запуска асинхронного двигателя, как с литой клеткой, так и со сварной клеткой, хорошо изучены, а их параметры регламентированы и приводятся в технических условиях (ТУ) на электрические машины. При этом, специалистам предприятий – изготовителей электрических машин известны не только процессы, которые могут протекать в «идеально изготовленном» двигателе, но и влияние технологических факторов, которые, как правило, отражены в допустимых зонах разброса параметров опыта короткого замыкания приемо-сдаточных испытаний (ПСИ). Более того, конструкторские службы производителей асинхронных машин при разработке технических условий на электродвигатели учитывают детали технологии производства короткозамкнутых роторов, а также материалы, используемые при их производстве, в том числе, с допусками на характеристики и вариантами замены этих материалов, что отражается в соответствующих стандартах предприятия (СТП).

9. Не ясна цель приведенного в параграф 6.6 материала, который представляет иное представление известной формулы для расчета максимального приводимого момента инерции, изложенной во многих каталогах на общепромышленные электродвигатели.

Заключение

Диссертация Метелькова Владимира Павловича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное

значение в рамках задачи обеспечения работоспособности и качества функционирования электроприводов переменного тока с короткозамкнутыми асинхронными двигателями при работе в различных режимах, а также в разработке подходов, методов и алгоритмов, обеспечивающих надежность, контроль и диагностику функционирования асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов. Диссертация удовлетворяет требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее содержание соответствует паспорту специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» и 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты». Автор диссертации Метельков Владимир Павлович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» и 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты».


Официальный оппонент, начальник конструкторско-исследовательского отдела ООО «Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения», доктор технических наук

 / Захаров Алексей Вадимович/

Дата составления отзыва: 23.03.2020

Подпись Захарова Алексея Вадимовича заверяю,
управляющий директор ООО «НИПТИЭМ»,
кандидат технических наук



 /Скитович Светлана Вадимовна/

ООО «Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения» (НИПТИЭМ). Адрес: 600007, Владимирская обл, город Владимир, улица Электrozаводская, дом 5 корпус 30 этаж 3, офис 25. www.niptiem.ru, E-mail: niptiem@ruselprom.ru