

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук

Казакова Юрия Борисовича

на диссертационную работу Косимова Бахтиёра Исматуллоевича

**«Разработка и исследование вентильного двигателя с когтеобразными полюсами привода пильгерстана для изготовления бесшовных труб»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

**Структура диссертационной работы** общепринятая, имеет четкое логическое построение, состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка (225 наименований), приложений. Диссертация изложена на 140 страницах основного текста, содержит 47 иллюстраций и 3 таблицы. По диссертационной работе сделаны выводы, представляющие результаты работы, рекомендации их практического применения и перспективы развития темы. Диссертационная работа изложена логичным, аргументированным и ясным языком, технически корректно оформлена.

**Актуальность темы.** Научные исследования, связанные с совершенствованием технологического процесса, созданием нового оборудования для производства конкурентоспособного с зарубежными аналогами, является актуальной задачей. Особенностью производства бесшовных труб в АО «Челябинский трубопрокатный завод» на сегодняшний день является значительный физический и моральный износ установленного оборудования, в частности, работающего с 1928 г. тихоходного коллекторного двигателя постоянного тока 2.7 МВт фирмы Siemens пилигримового агрегата в приводе пильгерстана металлургического проката бесшовных труб. В России работают 4 таких предприятия, в мире - 49 действующих пилигримовых агрегатов с 98 пильгерстанами. Электродвигатели пильгерстана должны быть способны работать в условиях больших динамических нагрузок; иметь низкую, но регулируемую частоту вращения (60-80 об/мин), при этом не допускается применение понижающего редуктора (из-за больших ударных нагрузок); иметь большую инерционную массу вращающихся частей для обеспечения ударных нагрузок; в связи непрерывной трехменной работой должны иметь максимальные КПД и надежность. Эти особенности работы не позволяют применить для привода пильгерстана серийные двигатели. В связи с этим диссертация Косимова Б.И., посвященная разработке и исследованию мощных вентильных электродвигателей с когтеобразной магнитной системой и кольцевым магнитом, работающих в приводе пильгерстана, является актуальной.

**В первой главе** описаны условия работы электродвигателя пильгерстана, отмечается необходимость замены коллекторного двигателя постоянного тока современным типом двигателя, проводится обзор возможных вариантов двигателей. В качестве базового варианта принимается вентильный электродвигатель с когтеобразной магнитной системой и кольцевым магнитом. Отмечено, что мировая практика не знает применения вентильных машин с постоянными магнитами больших диаметров от 5 до 10 метров. Прорабатывается технология сборки крупногабаритной электрической машины с постоянными магнитами без дополнительной дорогостоящей оснастки.

**Во второй главе** представлена разработка математической модели электромагнитного расчета крупногабаритных вентильных электродвигателей с когтеобразной магнитной системой и кольцевым магнитом. Обосновывается, что моделирование таких двигателей должно проводиться в трехмерной постановке. Приводится описание методик расчета когтеобразного индуктора и всего электродвигателя в целом, кото-

рые составляют основу математической модели для использования в оптимизационных исследованиях. В модели формализованы исходные данные, технологические и эксплуатационные ограничения, независимые переменные.

**Третья глава** посвящена разработке системы оптимизации электродвигателей. Представлена система многоуровневой однокритериальной оптимизации для применения в задачах проектирования мощных вентильных электродвигателей с когтеобразной магнитной системой и кольцевым магнитом.

**В четвертой** главе описывается система анализа электромагнитного состояния вентильных электродвигателей с когтеобразными полюсами. Она построена с применением современных САД систем по исследованию электромеханических преобразователей. САД системы объединены в единую программную оболочку и образуют подробную подсистему анализа характеристик двигателя с когтеобразными полюсами.

**Пятая глава** завершает исследование и построение проектной системы двигателя с когтеобразными полюсами. Представлен анализ электромагнитного и теплового состояния двигателя с учетом динамической нагрузки. Модель теплового анализа двигателя реализована с использованием метода тепловых эквивалентных схем замещения. Для анализа режима установившегося теплового состояния использован метод конечных-элементов. Дополнительно представлена разработка конструкции двигателя в программном комплексе Solidworks.

**В заключении** диссертации приведены основные результаты и выводы, отражающие содержание работы по созданию проектной системы мощных тихоходных двигателей с когтеобразными полюсами.

#### **Научная новизна:**

- Разработана математическая **модель** однокритериальной оптимизации вентильного двигателя с когтеобразными полюсами, отличающаяся учетом заданной инерционной массы вращающихся частей двигателя, необходимой для динамической нагрузки проката бесшовных труб.

- Разработана математическая **модель** электромагнитного состояния двигателя с когтеобразными полюсами на основе метода конечных элементов, отличающаяся сокращенным временем расчета, что обеспечивается разбивкой расчета два этапа: на первом рассматривается двухмерный аналог с плоской симметрией и эквивалентным рабочим магнитным потоком; на втором - на основании результатов первого этапа проводится анализ трехмерной электромагнитной модели электродвигателя.

- Разработана математическая **модель** теплового состояния двигателя с когтеобразными полюсами, отличающаяся решением связанных задач магнитодинамики и термодинамики с учетом высоких динамических нагрузок привода.

- Разработана **методика** оптимального проектирования крупногабаритных вентильных двигателей с когтеобразными полюсами для пильгерстана, отличающаяся учетом особенностей работы привода.

#### **Теоретическая и практическая значимость результатов работы**

Научная значимость результатов диссертации заключается в дальнейшем развитии теории вентильных машин с когтеобразной магнитной системой и кольцевым магнитом, в разработанных математических моделях, методиках расчета и программах, позволяющих проводить уточненное комплексное моделирование и исследование электромеханических и тепловых процессов в вентильных двигателях с когтеобразными полюсами, системе проектирования таких машин.

Практическая значимость результатов диссертации заключается в: повышении точности расчета характеристик вентильных машин с когтеобразной магнитной системой и

кольцевым магнитом; возможности разработки усовершенствованных конструкций таких двигателей; разработке реального двигателя для действующего производства и так как в методику разработки двигателя заложена необходимая инерционная масса вращающихся частей это позволило исключить из привода отдельно стоящий маховик, сократив габаритные размеры привода вдвое; разработке технологии сборки статора и ротора крупногабаритного двигателя с когтеобразными полюсами с индуктором на постоянных магнитах без дополнительной дорогостоящей специальной оснастки для снятия проблемы одностороннего магнитного тяжения, не позволяющей в крупных машинах с постоянными магнитами вставить ротор в статор; повышении КПД двигателя за счет применения для возбуждения двигателя постоянных магнитов и исключения потерь на возбуждение; использовании результатов теоретических и экспериментальных исследований в учебном процессе ВУЗов и АО «Русские электрические двигатели», что подтверждено Актами внедрения.

#### **Рекомендации по дальнейшему использованию результатов работы**

Полученные в диссертации результаты целесообразны к дальнейшему использованию в научно-исследовательских организациях при разработке новых перспективных вентильных электродвигателей с когтеобразной магнитной системой и кольцевым магнитом, в учебном процессе технических ВУЗов.

**Достоверность результатов и выводов работы** обоснована корректным использованием теории электромеханического преобразования энергии, математических методов моделирования электромагнитных и электромеханических процессов, численных методов расчетов физических полей на основе метода конечных элементов с использованием известных компьютерных систем моделирования. Проведенные теоретические исследования и расчеты на основе разработанных математических моделей, методик и программ подкреплены изготовлением с использованием технологии 3D принтера масштабной модели двигателя, что является дополнительным подтверждением корректности конструкторских решений и собираемости изделия.

#### **Полнота опубликования и апробации основных результатов диссертации**

Основные положения диссертации достаточно полно изложены в 11 работах, из которых 4 статьи опубликованы в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, и 7 работ индексированы в базе данных Scopus. Результаты исследований докладывались на Международных и Всероссийских конференциях. Это позволяет утверждать, что полученные результаты опубликованы с достаточной полнотой.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертация соответствует специальности 05.09.01 - Электромеханика и электрические аппараты и может быть рассмотрена в диссертационном совете УрФУ 05.01.02.

**Автореферат** отражает основное содержание диссертации, содержит выводы и полученные результаты исследования.

#### **Замечания по работе**

1. Выбор вентильного двигателя с когтеобразными полюсами и постоянным магнитом с учетом специфики привода пильгерстана – предельной мощности и динамических нагрузок, низких и регулируемых частот вращения, непрерывной трехсменной работы, требованием максимальных КПД и надежности, минимальной стоимости электродвигателя и системы управления; не очевиден. Применение вентильных машин больших габаритов мощностью в несколько мегаватт с постоянными магнитами, имеющих сложности со сборкой, проблематично. Надежность, стоимость двигателя и системы управления вряд ли сопоставимы с работающим уже почти 100 лет тихоходным коллекторным

двигателем постоянного тока. Для выбранного двигателя, ориентировочно, необходим кольцевой постоянный магнит с внутренним диаметром ~1200 мм, наружным диаметром < 4100 мм и длиной до 1 м. Неясно сколько будет стоить такой магнит. В диссертации Аминова Д.С. (стр. 37) утверждается, что «...высоту магнита из материала неодим-железо-бор более 300 мм на практике не изготавливают из-за невозможности их качественного промагничивания». Детально не проанализированы возможности применения АД или СД с ПЧ, ДПТ.

2. При описании электромагнитных и тепловых процессов в вентильном двигателе не отражен вентильный характер работы.

3. В системе электромагнитного анализа на первом этапе проводится замена электродвигателя с когтеобразной магнитной системой и трехмерным распространением магнитного потока на электродвигатель с тангенциальной магнитной системой, который допускает решение двухмерной электромагнитной задачи. Какова погрешность замены?

4. В соотношениях 5.1.3, 5.1.8 не учитывается индуктивное сопротивление обмотки якоря, хотя оно рассчитывается в соотношениях 2.3.20-2.3.22. При определении фазного тока (2.3.1) не учитывается  $\cos(\varphi)$ . Не показано как выбираются диаметры магнита.

5. Постоянная времени нагрева двигателя таких габаритов и массы составляет несколько часов. Неясна необходимость решения динамической тепловой задачи.

6. Нет свидетельств на программные продукты, разработанные и описанные в работе (« разработанный метод .. реализован в формате программ Mathcad и Delphi», «Математическая модель реализована в программной среде Delphi» и др.).

7. Совпадает текст диссертаций Косимова Б.И. стр. 43-47, 69-70, 98-100 и Аминова Д.С. стр. 53-57, 90-91, 104-105, посвященный описанию общих подходов к оптимизации. Однако в целом степень оригинальности текста диссертации высокая и достаточная.

8. Присутствуют недочеты в стилистике и оформлении диссертации (в автореферате указано, что в диссертации 107 стр. основного текста, во введении - 115 стр., в действительности – 140 стр.; стр. 3, 40 – орфографические ошибки). Присутствуют безапелляционные и не подкрепленные результатами утверждения, например, «... **все** основные электромагнитные процессы происходят в якоре», «если когтеобразный индуктор заменить индуктором другого типа с эквивалентным магнитным потоком, то **все** электромагнитные процессы ... будут идентичны», «... математическая модель магнитной цепи (*всего 12 сопротивлений с сосредоточенными параметрами для 3-х мерной модели*) ... учитывает **все** возможные потоки рассеяния», и в то же время на стр. 40 «... **не учтено** магнитное сопротивление когтя полюса», стр. 61 «Анализ целевых функций (*где?*) показал, что ... можно ограничить поиском локального экстремума». В заключении: п.1 «...предложена конструкция ..., удовлетворяющая требованиям надежности и энергоэффективности» - не показано; п.3. «Формализованы показатели качества» - не формализованы. Не обоснованно включение в список используемых источников публикации [106], источник [161] не приведен, ссылка [179] не соответствуют теме ссылки. Не вычленен личный вклад в статью: Ганджа С.А., Аминов Д.С., Косимов Б.И., Ниматов Р.Р. Разработка инженерной методики расчета магнитных систем с постоянными магнитами на основе метода конечных элементов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 29. – С. 58 – 74; 1.0 п.л.

Указанные замечания хотя и отражаются на качестве изложения, однако не меняют общего положительного мнения о данной работе.

### Заключение по диссертации

Диссертационная работа «Разработка и исследование вентильного двигателя с когтеобразными полюсами привода пыльгерстана для изготовления бесшовных труб» является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная задача уточненного анализа и проектирования крупногабаритного тихоходного вентильного двигателя с когтеобразной магнитной системой возбуждения, удовлетворяющего требованиям, предъявляемым к приводным электродвигателям пыльгерстана для изготовления бесшовных труб.

Диссертационное исследование соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.09.01- «Электромеханика и электрические аппараты» (отрасль наук - технические): пп. 2 «Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов», пп. 3 «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии», пп. 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».

Диссертация соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней УрФУ. **Косимов Бахтиёр Исматуллоевич** заслуживает присвоения ученой степени **кандидата технических наук** по специальности 05.09.01- «Электромеханика и электрические аппараты».

Официальный оппонент, доктор технических наук (диссертация защищена по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты), профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

  
\_\_\_\_\_ **Казakov Юрий Борисович**  
Дата составления отзыва «23» 10 2020

153003, Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, ИГЭУ, корп. А, ауд. 158.  
Телефон: +7 (4932) 269-706  
E\_mail: elmash@em.ispu.ru

Я, Казakov Юрий Борисович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись д.т.н., профессора Казкова Ю.Б. заверяю:

Ученый секретарь ученого Совета ИГЭУ \_\_\_\_\_ Ширяева Ольга Алексеевна  
«23» 10 2020 г.

