

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Драгунов Виктор Карпович

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» на диссертационную работу Иванникова Юрия Николаевича «Повышение энергетической эффективности активного электромагнитного подшипника», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты».

#### **Актуальность проблемы и темы диссертационной работы**

Использование в магистральных газопроводах нагнетателей с активными электромагнитными подшипниками (АЭМП) – одно из перспективных направлений совершенствования газоперекачивающих агрегатов, позволяющее решить ряд технических, экологических и экономических задач. Повышение энергетической эффективности активных электромагнитных подшипников путем снижения потерь, исключения локальных перегревов и интенсификации охлаждения, а также повышение точности расчетов на этапе проектирования за счет не учитываемых ранее особенностей их работы – актуальная задача по совершенствованию АЭМП.

#### **Оценка содержания диссертации**

Представленная к защите диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, библиографического списка, включающего 95 наименований, а также приложения. Работа изложена на 143 страницах и включает 55 рисунков и

10 таблиц. Приложения содержат 2 акта внедрения результатов научных исследований. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях.

**Во введении** дано обоснование актуальности работы, посвященной решению важной проблемы повышения энергетической эффективности активных электромагнитных подшипников за счет снижения наиболее значимых потерь, выделяемых в его активных частях. Сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость диссертации.

**В первой главе** проведен анализ устройства и принцип действия активного электромагнитного подшипника, рассмотрены основные конструктивные схемы. В работе исследуется конструкция АЭМП с поперечным направлением магнитного потока и с внешним по отношению к ротору индуктором с сосредоточенными полюсами. Особенности такой конструкции являются: большая амплитуда намагничивающей силы полюса, несимметричность и несинусоидальность знакопеременного магнитного поля в зазоре. В результате чего в теле шихтованного магнитопровода ротора (цапфы) возникают значительные потери на перемагничивание и вихревые токи. Эти потери оказывают существенное влияние на тепловое состояние обмоток электромагнитов и энергетическую эффективность всего комплекса АЭМП.

**Вторая глава** посвящена разработке математических моделей и анализу режимов работы и потерь, возникающих в активных частях АЭМП.

Для уточнения потерь на «магнитное» трение было проведено численное моделирование методом конечных элементов. Расчет основных потерь на гистерезис в программной среде *Ansys Maxwell* позволил учесть перемагничивание стали по частичным циклам, исходя из полученной площади петли гистерезиса, а расчет потерь на вихревые токи – на определении вихретоковой компоненты уравнения Штейнмеца. Уточнена величина потерь, выделяемых в стали на гистерезис и вихревые токи в результате отклика системы управления на отклонение ротора и потери от ШИМ.

**В третьей главе** автором разработана трехмерная математическая модель тепловых и газодинамических процессов в радиальном АЭМП, отличающаяся учетом турбулентности потоков охлаждающего агента. Решение тепловой и газодинамической задачи осуществлялось методом конечных элементов. С учетом особенностей исследуемой геометрической модели в качестве модели турбулентности для определения коэффициента теплоотдачи с поверхности была выбрана модель *Standard k- $\omega$* . Решение газодинамической задачи послужило граничным условием для тепловой задачи радиального АЭМП. Математическая модель тепловой задачи, решенная в трехмерной постановке, показала, что учет подогрева обмоток электромагнитов за счет потерь, выделяющихся в роторе, является обязательным.

**В четвертой главе** произведен анализ возможных путей совершенствования температурного состояния радиального АЭМП и его энергетической эффективности.

Снизить потери на «магнитное трение» предложено за счет придания полюсу соответствующей формы, что позволит добиться максимально возможного приближения формы кривой индукции в зазоре к синусоидальной. Для этого был увеличен воздушный зазор под краями полюсов и найдена зависимость потерь на «магнитное трение» в функции величины воздушного зазора под краем полюса, был проведен анализ возможности применения испарительной системы охлаждения, реализованной в виде термосифона в полости вращающегося ротора или введением тепловых трубок в цапфу ротора.

В результате проведенных исследований были предложены рекомендации по повышению энергетической эффективности радиального АЭМП газонагнетателя за счет уменьшения полных потерь на 10,8 %.

Показано, что за счет предложенных мер по снижению потерь в электромагнитах и совершенствования системы теплоотвода обеспечивается снижение массы и габаритов АЭМП, или повышение их грузоподъемности при неизменной потребляемой мощности.

## **Научные результаты диссертационной работы и анализ их новизны**

Научную новизну и ценность диссертационной работы Иванникова Ю.Н. определяют следующие результаты:

1. Уточнена методика аналитического расчета потерь в электромагнитах АЭМП, отличающаяся учетом потерь от высших пространственных и временных гармоник поля, а также добавочных магнитных потерь, вызванных откликом системы на возмущающее воздействие от вибраций ротора.
2. Предложена методика расчета теплового поля радиального АЭМП нагнетателя ГПА с учетом специфики электромагнитных и газодинамических процессов, происходящих при его работе.
3. Разработана уточненная трехмерная математическая модель газодинамических и тепловых процессов в радиальном АЭМП, отличающаяся учетом турбулентности потоков охлаждающего агента.

## **Практическое значение диссертационной работы**

Практическую значимость новых научных результатов, полученных Иванниковым Ю.Н., определяют следующие положения:

- предложенные на основе результатов исследования меры по снижению потерь в роторе радиального АЭМП;
- разработанные конструктивные решения для исключения недопустимых локальных перегревов и повышения энергоэффективности радиального АЭМП;
- предложенные меры повышения надежности радиального АЭМП за счет снижения тепловой напряженности наиболее уязвимых частей радиального АЭМП.

**Достоверность представленных результатов** обеспечивается строгим выполнением математических преобразований, принятием признанных допущений,

использованием современных математических моделей и пакетов программ. Адекватность результатов и выводов подтверждается согласованностью с опубликованными результатами работ других авторов и численным моделированием на 3D моделях.

#### **Замечания по диссертации:**

1. Могут ли быть распространены полученные результаты работы в виде рекомендаций по повышению энергоэффективности рассмотренного радиального АЭМП на конструкции других активных подшипников?
2. Из материалов диссертации не ясно как учитывалась при расчетах система управления АЭМП и возможные различные режимы работы подшипника.
3. Как влияет изменение формы полюсов с точки зрения газодинамических и тепловых процессов в АЭМП?
4. На рис. 4.7 представлено сравнение зависимостей потерь от зазора под краем полюса, рассчитанных с помощью численного моделирования и по предложенной формуле (4.4). Увеличение расхождения этих результатов (при увеличении зазора) объясняется автором «повышением потерь при насыщении, чего не учитывает 4.4)». Необходимо пояснение, почему расхождение, связанное с насыщением, проявляется сильнее при увеличении зазора, а также насыщение какого участка магнитопровода в данном случае имеется в виду?
5. В пояснении к рис. 2.1 не расшифровано, что такое  $R_{mg,rot}$ .
6. Из текста диссертации осталось не ясным, как была оценена энергетическая эффективность АЭМП.

#### **Заключение о соответствии диссертации установленным критериям**

Диссертация Иванникова Ю.Н., представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, отвечает квалификационным признакам и принципам соответствия, которые установлены нормативным документом «По-

ложение о порядке присуждения ученых степеней», утвержденном Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

Заявленная цель работы – повышение энергетической эффективности активных электромагнитных подшипников путем снижения потерь, исключения локальных перегревов и интенсификации охлаждения, а также повышение точности расчетов на этапе проектирования за счет не учитываемых ранее особенностей их работы – полностью достигнута в проведенных исследованиях.

Оценка содержания диссертационной работы Иванникова Ю.Н. проведена по паспорту научной специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»:

направлениями исследования являются «...исследования<...> направленные на совершенствование силовых и информационных устройств для взаимного преобразования электрической и механической энергии <...>, комплексные исследования научно-технических, проблем с целью повышения энергетической эффективности, технологичности и эксплуатационной безопасности преобразователей и аппаратов...»;

– область исследования соответствует: п.2. «Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов»; п.3. «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии»;

– объектом исследования «...силовые устройства для взаимного преобразования электрической и механической энергии».

Автореферат диссертации Иванникова Ю.Н. соответствует диссертационной работе по всем квалифицируемым признакам, а именно: по цели, задачам и основным положениям, определениям актуальности, новизны и достоверности, научной и практической значимости.

Выводы, сформулированные Иванниковым Ю.Н. по диссертационной работе, структурированы в соответствии с содержанием работы. В них убедительно отражена научная и практическая ценность проведенных исследований по

совершенствованию активных электромагнитных подшипников нагнетателя ГПА.

### **Публикации и апробация диссертационной работы**

По результатам диссертационной работы опубликовано 11 работ, из них одна работа индексируется в базе данных Scopus, 5 статей в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях.

Названные материалы с достаточной полнотой отражают существо рассматриваемой работы.

Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора в науку.

Диссертация написана корректным с научной и технической точки зрения языком. Содержание работы изложено на высоком научно-техническом уровне. Предложенные Иванниковым Ю.Н. решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными исследованиями по совершенствованию электромагнитных подшипников.

Редакционное оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям, установленным нормативными документами. Структура построения диссертационной работы позволяет рассматривать ее как единое целое.

Следует констатировать, что тема и содержание диссертации Иванникова Ю.Н. соответствуют паспорту специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты».

### **Оценка внедрения результатов диссертации и рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты диссертационной работы Иванникова Ю.Н. были использованы ООО «Фирма «КГПА» (г. Калининград) при создании, наладке и эксплуата-

ции системы магнитного подвеса СУМП-М «Неман-100» ротора нагнетателя ГПА-16 «Волга» на КС-22 «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ НИЖНИЙ НОВГОРОД» в виде математических моделей электромагнитного подшипника, а также нашли применение в учебном процессе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (г. Самара), что подтверждается актами внедрения.

Результаты проведенного научного исследования рекомендуется внедрять на газоперекачивающих станциях, оснащенных компрессорами с электромагнитным подвесом ротора, а также на предприятиях, занимающихся разработкой и выпуском высокоскоростных шпинделей с АЭМП.

Иванникову Ю.Н. следует продолжить работу в следующих направлениях:

- создание электромагнитных подшипников, отличающихся снижением потребления электрической энергии и уменьшением тепловых потерь;
- оптимизации электромагнитов для обеспечения снижения габаритов электромагнитов и системы управления.

### **Общее заключение**

Диссертация Иванникова Юрия Николаевича «Повышение энергетической эффективности активного электромагнитного подшипника» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему повышения энергетической эффективности активных электромагнитных подшипников за счет снижения наиболее значимых потерь, выделяемых в его активных частях. Получены новые научные результаты, имеющие теоретическую и практическую значимость. Опубликованные работы и выступления автора на научных мероприятиях полностью соответствуют теме диссертации по содержанию и выводам, что подтверждает личный вклад автора. Приведенные выше замечания не снижают ценности диссертации.

Диссертация соответствует требованиям ВАК (п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года, № 842), предъявляемым к диссер-



тациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор **Иванников Юрий Николаевич** заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты».

Диссертация Иванникова Ю.Н, автореферат диссертации и отзыв ведущей организации обсуждены на заседании кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» 31 октября 2019 г. Протокол № 8/19.

**Киселев Михаил Геннадьевич**  
кандидат технических наук,  
и.о. заведующего кафедрой  
«Электромеханика, электрические и  
электронные аппараты»  
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»



**Курбатова Екатерина Павловна**  
кандидат технических наук,  
старший преподаватель кафедры  
«Электромеханика, электрические и  
электронные аппараты»  
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

**Курбатов Павел Александрович**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры  
«Электромеханика, электрические и  
электронные аппараты»  
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
(ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)

Почтовый адрес: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14  
тел. 8(495) 3627781, e-mail: [universe@mpei.ac.ru](mailto:universe@mpei.ac.ru)