

## Отзыв

официального оппонента на диссертацию 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 темы

Одним из направлений развития электрических машин является улучшение их удельных энергетических показателей. Из одних и тех же объемов и масс необходимо извлекать все большие мощности. Одним из наиболее очевидных путей решения этой проблемы является повышение частоты вращения ротора. Движение в этом направлении привело к созданию электромеханических систем с частотами вращения, при которых опоры качения и скольжения применить нельзя по причине низкой надежности. Гидравлические и газодинамические подшипники, имеющие проблемы в режиме старта, более сложные в технологии изготовления, требующие дополнительного обслуживания и ремонта, тоже не всегда можно использовать в системах, где требуется высокая надежность, простота эксплуатации, экологичность. Это прежде всего космос, медицина, специальное применение.

Магнитные подвесы могут успешно решить ряд перечисленных проблем. Методы исследования этих устройств начали развиваться достаточно давно, но сложность физических процессов, происходящих в магнитных подшипниках до сих пор не позволила разработать методики, которые по точности расчета удовлетворили бы инженерную практику. Современное развитие вычислительной техники и программных средств дают исследователям возможность решать эти задачи. В связи с этим научные изыскания и инженерные работы в этом направлении следует признать важными и актуальными. Представленная к защите диссертация представляет собой такой научный труд.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Работа изложена на 141 странице, включая 53 рисунка и 10 таблиц. Список использованной литературы включает 95 наименований.

**В первой главе** диссертации дается анализ конструкции активного магнитного подшипника, описан принцип действия, рассмотрены основные конструктивные схемы. Отмечено, что для разработки устройства необходимо комплексное решение технических задач: это расчет электромагнитного поля и теплового состояния. Эти задачи взаимно влияют друг на друга, и это влияние необходимо учитывать для повышения точности методики расчета.

**Вторая глава** посвящена анализу энергетических процессов в магнитном подшипнике. Отмечено, что практически вся энергия, которую потребляет подшипник для подвешивания массы вращающихся частей, в конечном счете, превращается в тепловые потери. Энергия, которая идет на динамику переходного процесса, незначительна. Сделан подробный анализ электрических маг-

нитных потерь и механических потерь на трение. Для анализа электрических и магнитных потерь использованы новейшие программные средства Ansys Electronics Desktop.

**В третьей главе** исследовалось тепловое состояние магнитного подшипника с учетом потерь, определенных в предыдущей главе. Точность теплового расчета, даже с использованием современных САД систем, зависит от правильного определения скорости движения воздушных охлаждающих потоков, которые определяют эффективность теплоотдачи с обдуваемых поверхностей. В главе предварительно решена газодинамическая задача по расчету скоростей охлаждающего агента, а затем результаты расчета были переданы в задачу расчета тепла. Для обеих задач была использована программная среда Ansys Fluent.

**Четвертая глава** посвящена анализу полученных результатов и техническим предложениям по улучшению конструкции подшипника в плане уменьшения потерь и улучшения системы охлаждения. Предложенные мероприятия по изменению формы полюсного наконечника и применению центробежно-осевого испарительно-конденсационного теплопровода позволили существенно улучшить тепловое состояние подшипника, понизив температуру более чем на 20 градусов Цельсия.

**В заключении** диссертации приведены основные результаты и выводы, отражающие содержание работы.

#### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертация соответствует паспорту специальности: в части формулы специальности: «специальность, объединяющая исследования по физическим и техническим принципам создания и совершенствования силовых и информационных устройств для взаимного преобразования электрической и механической энергии»; в части области исследований: 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».

#### **Научная новизна**

В работе получены следующие научные результаты:

1. Автор разработал методику аналитического расчета потерь в магнитном подшипнике, при этом учел все виды потерь, включая электрические, магнитные и механические. Причем методика учитывает динамическую нагрузку, связанную с откликом системы на возмущающие воздействия, действующие на ротор.

2. В диссертации разработана методика теплового расчета на основе решения связанной задачи газодинамики и термодинамики

3. Разработана трехмерная модель активного магнитного подшипника, представляющая собой цифровой двойник для газодинамических и тепловых расчетов.

Полученные в работе математические модели и схемы обладают достаточной общностью и могут быть использованы для исследования и проектирования подобных типов активных магнитных подшипников.

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

Теоретическая значимость работы состоит в том, что автору удалось в процессе исследования решить сложную связанную задачу трех дисциплин: электродинамики, газодинамики и термодинамики. Именно комплексное решение поставленной задачи на основе использования современных CAD систем позволило получить результат, имеющий научную ценность. Решение связанных задач – это последние тенденции в теоретических исследованиях в области электромеханики. Современное развитие программного обеспечения и вычислительных мощностей предоставляет такую возможность, но реально решенных связанных задач в электромеханике пока немного. В работе показана методология решения этой проблемы.

Разработанные автором цифровые аналоги реальной конструкции тоже могут быть использованы в теоретических исследованиях подобных устройств.

Вклад в теорию представляют аналитические зависимости определения потерь, которые подтверждены практическими расчетами на цифровых моделях.

Практическим результатом следует признать улучшение параметров реального устройства, в частности снижение потерь и уменьшения тепловой нагрузки.

Ценной практической рекомендацией, подтвержденной расчетами, следует признать определение оптимальной формы полюсного наконечника магнитной системы статора.

Разработанные цифровые модели параметризованы. Их можно использовать для разработки ряда подшипников этого типа.

Прикладное значение рассматриваемой работы подтверждено актами внедрения разработок автора, представленными в Приложении диссертации.

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

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в проектных организациях, конструкторских бюро и на промышленных предприятиях, занимающихся разработкой, проектированием и изготовлением магнитных подвесов, работающих в области космических технологий, медицины, военной спецтехники, а также в учебном процессе вузов технических специальностей.

### **Достоверность результатов работы**

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием уравнений электродинамики, газодинамики, термодинамики, подтверждением полученных решений результатами экспериментальных исследований.

### **Апробация диссертации и публикаций**

Основные материалы работы и её результаты достаточно полно отражены в 11 публикациях автора, из которых 1 работа индексируется в наукометрической базе Scopus, 5 статей в журналах из перечня ВАК. Диссертация прошла апробацию на многих научно-технических конференциях, симпозиумах, совещаниях различного статуса, на которых были представлены доклады автора.

**Автореферат и публикации автора** отражают основное содержание диссертации и соответствуют требованиям, предъявляемым ВАК Министерства науки и высшего образования РФ. Результаты диссертации отражены в опубликованных работах. Автореферат и диссертация написаны в строго логической последовательности, математические выводы понятны и физически обоснованы. При использовании в тексте диссертации результатов других авторов сделаны соответствующие ссылки. Работа оформлена в соответствии с существующими требованиями.

### **Вопросы и замечания по работе**

1. В настоящее время разработаны и промышленно выпускаются мощные высококоэрцитивные магниты из материалов неодим-железо-бор, самарий-кобальт. Магнитные системы на базе этих магнитов имеют малые габариты и большие индукции в воздушном зазоре. Почему магнитные подшипники на базе постоянных магнитов исключены из рассмотрения в данной работе?

2. Задача электромагнитного анализа имеет осевую симметрию в пространстве и неизменную геометрию во времени. Почему для ее анализа выбран самый сложный режим программы Ansys Electronics Desktop Transient (переходный процесс)? Возможно ли упростить анализ, переведя ее решение в режимы Magnetostatic (магнитостатика) или Eddy Current (вихревые токи)?

3. В работе указано, что усилие магнитного подшипника зависит от скважности напряжения между амплитудой и паузой напряжения в широтно-импульсном модуляторе (рис.2.10). Следует пояснить, как эта скважность формируется в схеме эмитатора 2.16.

4. Магнитный подшипник представляет собой упругий подвес. Каким образом происходит в нем демпфирование колебаний при динамических внешних воздействиях. Критичен ли магнитный подшипник к резонансным частотам во время разгона ротора?

5. Данные исследования представляют собой подробный анализ существующей конструкции. На базе данных исследований необходимо разработать инженерную методику по расчету магнитных подшипников подобного типа с определением основных размеров цапфы, зазора, числа полюсов, НС катушек в зависимости от заданной массы, которую надо подвесить.

6. Работа содержит обширный материал по моделированию электромагнитных, газодинамических и тепловых процессов. Этот материал очень интересен научной общественности, которая занимается этими проблемами, но в должном объеме эти материалы ни в автореферате, ни в приложении к диссертации не по-

казаны. Рисунки автореферата имеют низкое качество. Часть интересного материала, например, об испарительных системах охлаждения с разными вариантами исполнения, в автореферате практически не представлена.

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

### **Заключение по диссертации**

Диссертационная работа на тему: «Повышение энергетической эффективности активного электромагнитного подшипника» является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена проблема анализа магнитного подвеса для высокоскоростных электромеханических систем.

Диссертационное исследование соответствует паспорту специальности 05.09.01- «Электромеханика и электрические аппараты».

Работа отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 (п. 28), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Иванников Юрий Николаевич заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01- «Электромеханика и электрические аппараты».

Официальный оппонент, доцент, доктор технических наук (05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты), заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» Энергетического факультета Политехнического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (ПИУ)»

Ганджа Сергей Анатольевич

Служебный адрес: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина 76, ауд.267,  
кафедра «Теоретические основы электротехники»,  
Телефон: +7 (351) 267-91-51  
Факс: +7 (351) 267-99-00  
E-mail: [gandja\\_sa@mail.ru](mailto:gandja_sa@mail.ru)

Подпись Ганджи С.А. заверяю:

