



**Уральский
федеральный
университет**

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» (УрФУ)

ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002,
факс: +7 (343) 375-97-78; тел.: +7 (343) 374-38-84
контакт-центр: +7 (343) 375-44-44, 8-800-100-50-44 (звонок бесплатный)
e-mail: rector@urfu.ru, www.urfu.ru
ОКПО 02069208, ОГРН 1026604939855, ИНН/КПП 6660003190/667001001

29.09.2016 № 05-19/L-114
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ



ке

й сотрудник

Кружаев



Владимир Венедиктович

9 " 09 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Ульянова Александра Владимировича
«Разработка и исследование электротехнического комплекса газоманнитных
опор высокоскоростного электрооборудования», представленную на
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

1. Актуальность темы

Одними из важнейших узлов высокоскоростного электрооборудования являются подшипниковые узлы. От них зависят скорость вращения, мощность и надежность работы машин, очевидно влияние опор на массогабаритные и стоимостные показатели оборудования.

Традиционно в качестве опор электрооборудования используют подшипники качения. Однако контактный принцип работы таких опор ограничивает их быстроходность. Альтернативой подшипникам качения являются гидростатические подшипники, но их применение на высоких скоростях сопровождается высоким тепловыделением и трением. Бесконтактные опоры на газовой смазке обеспечивают высокие скорости вращения, однако их недостатком является сравнительно низкая несущая

способность. В качестве бесконтактных быстроходных опор используют также активные магнитные подшипники. Недостатками последних являются сравнительно низкая надежность вследствие возможности контакта ротора с магнитными полюсами статора и необходимость иметь страховочный механический подшипник для предотвращения аварийных ситуаций.

В своей работе соискатель в высокоскоростном электрооборудовании предлагает использовать электротехнический комплекс газоманитных опор (ГМО), сочетающий в себе бесконтактные газостатический и активный магнитный подвес, что позволяет повысить несущую способность подшипниковых узлов, существенно увеличить жесткость и точность позиционирования ротора. Разработка и исследование такого комплекса, содержащего электромеханическую часть и систему управления, несомненно, является актуальной научно-технической задачей.

2. Структура работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, приложения. Работа содержит 161 страницу основного текста, 94 рисунка, 5 таблиц, библиографический список из 110 наименований.

Во *введении* выявлена актуальность темы, сформулированы цели, задачи и методы исследования, охарактеризованы его научная новизна и достоверность, показана практическая значимость работы, приведен перечень основных положений, выносимых на защиту, изложено краткое содержание глав диссертации.

В *первой главе* выполнен обзор современного состояния в области бесконтактных опор высокоскоростного электрооборудования, проанализированы преимущества и недостатки электромагнитных, газовых и ГМО. Сделан вывод, что для улучшения эксплуатационных характеристик ГМО необходима разработка электротехнического комплекса, включающего электромеханическую часть и систему управления (СУ) активным магнитным подвесом.

Во *второй главе* предложены варианты компоновочных схем ГМО, проанализированы их преимущества и недостатки и сделан выбор оптимальной схемы для использования в высокоскоростном электрооборудовании. Рассмотрено суммарное действие сил на ротор, установленный на ГМО, предложена методика расчета тягового усилия ГМО с учетом совместного действия газовых и магнитных сил.

Автором рассмотрены два варианта компоновочных схем радиальных ГМО - с поперечным и продольным расположением магнитопроводов. Варианты конструкций ГМО разработаны в среде T-FLEX CAD, проведено моделирование магнитной части опор в пакете Ansoft Maxwell.

Для дальнейшего исследования выбрана структура с продольным расположением магнитопроводов как обладающая наименьшим магнитным торможением. Показано, что использование трех магнитопроводов позволяет получить максимальную площадь полюсов и в наибольшей степени задействовать систему управления (СУ) магнитной частью опоры при сохранении возможности получения вектора магнитной силы в произвольном радиальном направлении. Выявлено распределение магнитной индукции в магнитной части опоры. Описана методика определения тягового усилия ГМО.

В *третьей главе* рассмотрен синтез СУ ГМО, проведено ее исследование, предложен алгоритм проектирования СУ.

Автором получено описание ГМО как объекта управления. Предложена структурная схема трехканальной СУ ГМО. Определены выражения для нахождения коэффициентов регулятора. Разработан алгоритм устранения ошибки измерения зазора между ротором и опорой, возникающей из-за отклонения формы ротора от окружности.

Разработанный электротехнический комплекс ГМО исследован на устойчивость с использованием критерия Найквиста в логарифмической форме и определены установившиеся ошибки в системе.

В среде имитационного моделирования Control Design and Simulation Module пакета LabVIEW промоделирована работа СУ и показано преимущество ГМО перед газостатической опорой по несущей способности и точности поддержания эксцентриситета.

Предложен алгоритм проектирования СУ.

В *четвёртой главе* описаны экспериментальные стенды и опытный образец ГМО с продольным расположением П-образных магнитопроводов, представлена техническая реализация СУ на аппаратном и программном уровне, а также приведены результаты испытаний электротехнического комплекса ГМО.

Получены нагрузочные характеристики ГМО, апробирован алгоритм устранения ошибки измерения зазора между ротором и опорой из-за отклонения формы вала от окружности. Приведена конструкторская документация, по которой выполнена опытная ГМО.

Предложены функциональная и принципиальная электрические схемы СУ. В качестве устройства управления выбран промышленный контроллер sbRIO компании National Instruments с возможностью аппаратной реализации СУ на базе программируемой логики. Подробно описано разработанное программное обеспечение.

Сняты экспериментальные зависимости тягового усилия ГМО от тока в обмотке электромагнита и несущей способности опоры от относительного эксцентриситета.

3. Основные научные результаты

К основным научным результатам работы относятся:

- результаты исследования в среде имитационного моделирования электромагнитных процессов ANSYS Maxwell распределения магнитной индукции в магнитной цепи конструкции ГМО с низким магнитным торможением;

- алгоритм проектирования СУ, позволивший реализовать цифровую СУ на базе ПЛИС. Работоспособность СУ подтверждена в среде имитационного моделирования Control Design and Simulation Module пакета LabVIEW и при проведении экспериментальных исследований;

- алгоритм устранения ошибки измерения зазора из-за неидеальной округлости поверхности вала путём нахождения среднеарифметического значения измеренного зазора за определенное число целых периодов вращения ротора, позволяющий исключить влияние профиля поверхности вала на процесс управления.

4. Практическая значимость

Практическое значение имеют предложенные структуры СУ и конструкции электромеханической части ГМО, а также алгоритм проектирования СУ ГМО. Несомненный практический интерес представляет цифровая СУ ГМО на базе ПЛИС, а также опытный образец ГМО с низким магнитным торможением. Следует отметить и практическую значимость для разработчиков подобных систем предложенный автором алгоритм по устранению ошибки измерения зазора из-за отклонения формы вала и программу построения годографа ротора.

Работа, как следует из материалов диссертации, выполнена при поддержке гранта № 14.В37.21.0449 «Совершенствование металлорежущих станков путем внедрения в их конструкцию сверхпрецизионных высокоскоростных шпиндельных узлов на бесконтактных опорах для обработки ответственных деталей силовых и вспомогательных установок кораблей и объектов океанотехники».

Результаты диссертационной работы использованы в производстве на ПАО "Амурский судостроительный завод" (г. Комсомольск-на-Амуре) в виде проектно - конструкторской документации. Выполненные исследования послужили основой разработки СУ для опытно-промышленного образца

высокоскоростного электрошпинделя с передней управляемой ГМО для внутришлифовального станка ЗК227А.

Результаты работы также используются в учебном процессе на кафедре «Промышленная электроника» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет».

5. Достоверность и обоснованность основных результатов работы

Достоверность результатов работы подтверждается корректным использованием теоретических и экспериментальных методов исследования.

Основные положения и выводы, полученные автором в диссертации, основаны на использовании аналитических и численных методов электромагнитных расчетов, синтеза и анализа систем автоматического управления, а также методов разработки электрических цепей, микроэлектронных и микропроцессорных устройств. Используются современные пакеты прикладного программного обеспечения ANSYS, Matlab, LabVIEW, MathCAD. Экспериментальные исследования проведены на модернизированных автором стендах.

Достоверность результатов также подтверждается положительными экспертными оценками в ходе их обсуждения на кафедре, конференциях, семинарах и в научно-техническом совете.

Это позволяет сделать вывод о достаточной степени обоснованности и достоверности выполненного исследования.

6. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

В целом работа имеет вполне определенную практическую направленность. Разработанные автором положения рекомендуется использовать научно-исследовательским и проектным организациям, занимающимся разработкой систем высокоскоростного электропривода на бесконтактных опорах. Кроме того, предложенный электротехнический

комплекс может быть использован в станках для высокоточной металлообработки.

Результаты экспериментальных исследований показали, что использование ГМО с активным управлением позволяет в номинальном режиме повысить точность вращения ротора в 9,6 раз и увеличить несущую способность на 22 %.

7. Апробация и публикации

По теме диссертации опубликовано 15 работ, 4 из которых в журналах, рекомендованных ВАК, 6 в научно-технических журналах и сборниках, 3 патента и 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Получены патенты РФ: № 2545146 «Способ работы управляемого газоманитного подшипникового узла и подшипниковый узел», №135747 «Газоманитный подшипниковый узел с поперечным расположением магнитопроводов», №134260 «Газоманитный подшипниковый узел с продольным расположением магнитопроводов», и свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012660515 «Модуль построения годографа роторной системы», №2013617434 «Определение зазора в газоманитной опоре при неидеальной округлости вала».

Автореферат достаточно полно и объективно отражает основные результаты работы.

8. Замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе Ульянова А.В. имеются следующие замечания:

1. В работе не определен критерий выбора магнитной системы. Остается неясным, чем руководствовался диссертант при выборе геометрических размеров магнитопроводов.

2. В первой главе диссертационной работы подробно рассмотрены активные магнитные и газовые подшипники. Возникает

вопрос, почему автор не рассмотрел гидростатические и гидродинамические подшипники?

3. Во второй главе автор предлагает конструкции ГМО, встраивая магнитопроводы в конкретный тип вкладыша газостатического подшипника. Почему не были рассмотрены другие виды вкладышей газостатического подшипника?

4. Не дано обоснование выбора газостатического подшипника, входящего в ГМО.

5. Автор рассматривает только радиальные ГМО. Возникает вопрос, почему не рассмотрены торцевые ГМО, возможна ли их реализация?

6. Из материалов главы 3 остается неясным, как выбирается быстродействие (полоса пропускания) СУ ГМО?

7. Как учитывается нелинейность электромагнитной системы при синтезе регуляторов СУ ГМО?

9. Выводы

В целом диссертационная работа «Разработка и исследование электротехнического комплекса газоманитных опор высокоскоростного электрооборудования» является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложено научно обоснованное техническое решение задачи создания электромагнитного подвеса как управляемой активной части ГМО высокоскоростного электрооборудования, работающего во взаимодействии с газостатическим подвесом, имеющее существенное значение для машиностроительной отрасли страны. Основные положения диссертации апробированы на международных научно-технических конференциях, в достаточной степени представлены в научных публикациях автора и соответствуют паспорту специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. По совокупности представленных результатов диссертационная работа отвечает требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к

кандидатским диссертациям, а ее автор, Ульянов Александр Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Диссертация, автореферат и отзыв рассмотрены и обсуждены на заседании кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» УралЭНИН УрФУ 29.09.2016 г., протокол № 51.

Зав. кафедрой
«Электропривод и автоматизация
промышленных установок»
к.т.н. доцент

Костылев Алексей Васильевич

Профессор кафедры
«Электропривод и
автоматизация промышленных
установок»
д.т.н. доцент

Зюзев Анатолий Михайлович

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»
г. Екатеринбург, 620002
ул. Мира, 19, ауд. Э-205
Телефон: 8(343)3754646
E-mail: a.v.kostylev@urfu.ru

*Подписи Костылева А.В. и Зюзева А.М.
заверены:*

У
У
М

СТАРЬ

А.

