

Председателю диссертационного  
совета 24.2.353.02  
при ФГБОУ ВО «Орловский  
государственный  
университет имени И.С. Тургенева»  
д.т.н., проф. Голенкову В.А.

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Фетисова Александра Сергеевича

на тему «Грузоподъемность и динамические характеристики  
магнитореологических подшипников жидкостного трения»  
по специальности 2.5.2 Машиноведение (технические науки)

### **Актуальность избранной темы**

Мировые тенденции по снижению вибраций роторных машин, повышению надежности и ресурса их опорных узлов приводят к необходимости оптимизировать характеристики подшипников и опор роторов. Применение различных методов управления жесткостью и демпфирования в опорах роторов в качестве средства варьирования, как характеристиками самих опор, так и роторной системы в целом, хорошо известно. Одним из направлений развития техники является повышение управляемости технических систем за счет интеграции элементов диагностики и активного управления рабочими характеристиками. Управление осуществляется за счет давления, расхода и реологических параметров смазочного материала. Актуальные исследования в данной области затрагивают вопросы применения в опорах скольжения магнитореологических смазочных материалов. Важной задачей является создание математической модели опорного узла учитывающего

динамическое поведение роторной системы. Такая модель позволит оценить и проанализировать конкретную конструкцию и оценить необходимость применения активного управления. Магнитореологические жидкости под действием приложенного электромагнитного поля изменяют свои главные реологические характеристики - предел текучести и вязкость. Использование магнитореологических смазочных материалов применительно к опорам скольжения позволяет значительно изменять грузоподъемность и динамические характеристики опоры.

Диссертация Фетисова А. С. посвящена совершенствованию динамических и энергетических характеристик роторных систем на радиальных подшипниках жидкостного трения за счет применения магнитореологических смазочных материалов и активного управления их параметрами. В России работ, посвященных применению такого подхода на настоящее время недостаточно для их широкого практического применения. Это связано с тем, что подобные работы требуют глубоких знаний в таких областях наук как гидродинамика, мехатроника, машиностроение и динамика роторов. Все это обуславливает значительный интерес к поставленной задаче применения магнитореологических смазочных материалов и активного управления их параметрами и моделирования динамического поведения роторов на подшипниках скольжения с магнитореологическими смазочными материалами. Он вызван, с одной стороны практическими потребностями в повышении эффективности работы подшипников скольжения, а с другой открывающимися возможностями применения созданных математических моделей при проектировании и доводке таких опор. Поэтому работа на избранную тему является **актуальной** и имеет прикладное значение.

Основной **целью** диссертационной работы является повышение показателей работы роторно-опорного узла, снижение уровня колебаний ротора, повышение несущей способности, надежности и ресурса роторных



агрегатов с опорами жидкостного трения посредством использования гидродинамических подшипников с магнитореологическими смазочными материалами.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации полностью обоснованы. Это подтверждается положительной оценкой результатов работы на международных конференциях (7 докладов) и публикациями в рецензируемых журналах из перечня ВАК (10 публикаций) и в издании, индексируемом в базах SCOPUS и Web of Science (10 публикации).

### **Достоверность и новизна полученных результатов**

Достоверность полученных результатов обусловлена комплексным подходом к формулировке задачи, корректным использованием методов вычислительной математики, теории магнито-гидродинамики, теории математического моделирования процессов и систем, теории планирования эксперимента, а также обоснованным выбором допущений и ограничений в методах и моделях, используемых при реализации численного алгоритма. Дополнительно достоверность подтверждается согласованием результатов теоретических и экспериментальных исследований, средние ошибки не превысили 12-14%.

Новизна результатов исследований заключается в следующем:

1. Выполнена постановка и решение задачи по определению полей давлений в несущих слоях магнитореологических подшипников жидкостного трения с использованием модифицированного вариационного подхода, позволяющего провести моделирование течений дилатантных, псевдопластичных и пластичных сред с учетом массовых сил, в том числе электромагнитной природы.
2. Выполнен структурный и параметрический синтез

магнитореологических подшипников жидкостного трения, обеспечивающий однородность поля магнитной индукции в смазочном слое. Использована возможность интегрирования функций диагностики и активного управления несущей способностью и динамическими характеристиками.

3. Разработан в средах Matlab и Simulink комплекс математических моделей, алгоритмов и программ расчета динамических характеристик роторных систем с подшипниками жидкостного трения с учетом нелинейных свойств магнитореологических жидкостей. Комплекс позволяет определять гидродинамические реакции смазочного слоя, коэффициенты жесткости и демпфирования, собственные частоты колебаний роторов. Численно решена задача по определению полей давлений и сил реакций несущего слоя радиального гидродинамического подшипника.

4. Разработанный комплекс математических моделей, алгоритмов и программ расчета позволяет рассчитывать параметры течения жидкости в области трения и шероховатости трущихся поверхностей ротора и подшипника.

5. Теоретически доказано и экспериментально подтверждено повышение несущей способности и снижение вибрационных перемещений ротора в подшипнике с магнитореологической смазкой.

6. Выявленные закономерности работы активных зон рассматриваемых подшипников позволяют находить зоны их наибольшей эффективности.

7. Разработан в виде программного комплекса для ЭВМ новый инструментарий для проектирования радиальных подшипников скольжения с магнитореологической смазкой. С учетом рекомендаций для расчета он позволяет проектировать опорные узлы с улучшенными характеристиками.



## **Теоретическая и практическая значимость результатов исследований**

Решение задачи повешения эффективности радиальных подшипников скольжения важно, прежде всего, для высоконагруженных опор роторов, где применение другого типа подшипников нецелесообразно. Зачастую работоспособность и ресурс таких опор определяется их несущей способностью и динамическими характеристиками. Представляется возможным использование разработанных математических моделей и программного обеспечения для проектирования гидродинамических подшипников с активным управлением и тем самым повысить надежность и ресурс агрегатов.

Практическая значимость заключается во внедрении методологии исследований и экспериментальной установки в учебный процесс кафедры «Мехатроника, механика и роботехника» ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева».

## **Содержание диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 200 наименований. Работа изложена на 223 страницах, содержит 87 рисунков, 6 таблиц и 4 приложения.

Во введении обоснована актуальности работы, степень разработанности темы, сформулированы цели и задачи исследований, указаны методы исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведен анализ существующих решений в области опор скольжения, смазываемых магнито-реологическими жидкостями, как объекта исследования.

Вторая глава посвящена вопросам разработки комплексной математической модели роторной системы на опорах скольжения,

смазываемых магнитореологическими жидкостями и динамической модели системы «ротор-подшипник».

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям характеристик опоры скольжения, смазываемой магнитореологической жидкостью и включает постановку и планирование эксперимента, описание экспериментального стенда, методику проведения экспериментальных исследований, описание процедуры обработки результатов и верификацию математической модели.

В четвёртом разделе представлены результаты исследования подшипников жидкостного трения, смазываемого магнитореологическими жидкостями. В программной среде Ansys CFX выполнены расчеты динамических коэффициентов жесткости и демпфирования для различных условий работы.

В пятой главе рассмотрены вопросы проектирования опор роторов, смазываемых магнитореологическими жидкостями.

В заключении приведены основные результаты и выводы по работе.

В приложениях приведены:

- конструкторская документация по экспериментальному стенду для исследования опор скольжения, смазываемых магнитореологическими жидкостями,
- листинг основных расчетных модулей программы,
- патенты и свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.,
- акты внедрения результатов диссертационного исследования.

### **Замечания**

1. В работе имеется ряд недостатков в изложении и оформлении, имеются нестрогие формулировки. Например, в гл. 1.5 упоминаются «большие



динамические характеристики» подшипника. Расшифровка данных на графиках также не всегда достаточно полна.

2. Во введении утверждается, что уникальность подшипников скольжения как узлов роторов заключается в необходимости разработки подшипника с учетом особенностей работы всей машины – это не так. Их уникальность в первую очередь заключается в значительной статической и динамической грузоподъемности. На первых этапах проектирования таких опор достаточно знать рабочие частоты вращения ротора и силу веса, приходящуюся на опору.
3. В достаточно объемном обзоре литературы параметры анализируемых опор, такие как грузоподъемность, эквивалентная вязкость смазки и т. п. приведены в разных абсолютных величинах, что не позволяет сравнить их между собой. Например, указание исследованных диапазонов оборотов без указания диаметра подшипника не позволяет оценить и сравнить масштабы исследованных подшипников и, как следствие, область применимости результатов.
4. В работе для расчета динамических характеристик ротора применен достаточно сложный конечно-элементный алгоритм. Расчет описанного в работе простого ротора мог быть выполнен с гарантированно высокой точностью другими широко известными методами, такими как метод динамических жесткостей.
5. В принятой компоновке стенда и постановке эксперимента оценивается суммарное демпфирование и исследуемой опоре, смазываемой магнитореологическими жидкостями, и второй шарикоподшипниковой опоре. С другой стороны, все результаты отнесены только к исследуемому подшипнику скольжения, и добавки от второй опоры, например, к моменту трения, даже не упоминаются.
6. В работе не проведены общепринятые простые «установочные» модульные эксперименты, например, определение собственных частот и

форм колебаний экспериментального ротора без вращения. Такие испытания, как правило, используются для верификации расчетной модели.

7. В эксперименте использована высокоточные датчики и вторичная аппаратура, но ни в тексте, ни на рисунках, не показано расположение датчиков виброперемещений ротора, от которого в значительной мере зависит информативность испытаний. То же замечание можно сделать относительно измерений давления.
8. Изложенные в заключении выводы по работе не определяют области применения разработанных методов расчета характеристик и оптимизации параметров опор. Также не приведены оценки области применимости полученных результатов. Например, все результаты приведены для частот вращения от 1000 до 4000 об/мин, но из текста неясно, как приложить эти результаты к аналогичному подшипнику с той же окружной скоростью скольжения, но меньшего или большего диаметра.
9. Один из наиболее значимых описанных эффектов – повышение несущей способности подшипникового узла. Однако в работе никак не оценивается конструктивная «цена» этого выигрыша, а именно неизбежное увеличение габаритов узла, связанное с необходимостью размещения магнитов, размеры которых, в свою очередь, определяются напряженностью создаваемого магнитного поля.
10. В работе следовало бы уделить больше внимания многорежимным машинам, в которых проявляется совместное влияние частоты вращения ротора и радиальной нагрузки на положение равновесия ротора.

Перечисленные замечания не снижают научную значимость и общую положительную оценку представленной работы, а скорее относятся к пожеланиям по дальнейшей работе автора.



## **Заключение**

Диссертация Фетисова Александра Сергеевича на соискание ученой степени кандидата технических наук представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной задачи обеспечения энергоэффективных режимов работы роторно-опорного узла с опорами жидкостного трения посредством использования смазки магнитореологическими жидкостями.

Содержание и структура работы построены в логической последовательности, ее материал изложен грамотным языком, цели и задачи работы выполнены полностью, результаты работы отличаются существенной новизной.

Автореферат диссертации полностью соответствует ее содержанию.

Основное содержание диссертации полностью отражено в публикациях автора.

Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления». – М.; Стандартинформ. – 2012.

Диссертация полностью отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней №842 от 24.09.2013. В диссертации имеются сведения о практическом применении результатов исследований (п. 10 Положения), результаты исследований опубликованы в 10 печатных работах, в том числе в 10 работах в изданиях из перечня ВАК и 10 работах в изданиях, индексируемых в базах SCOPUS и Web of Science (п. 11 Положения), при заимствовании материалов приведены ссылки на источник, в том числе и на работы, выпаленные соискателем в соавторстве (п. 14 Положения).

На основании вышеизложенного считаю, что диссертация Фетисова Александра Сергеевича, выполненная на тему «Грузоподъемность и

динамические характеристики магнитореологических подшипников жидкостного трения» по специальности 2.5.2 Машиноведение (технические науки), полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.2 Машиноведение (технические науки).

Я, Давыдов Аркадий Валентинович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

Давыдов Аркадий Валентинович,

кандидат технических наук по специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов», доцент кафедры 203 «Конструкция и проектирование двигателей»

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Адрес: Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, 125993 Тел:+7 (499) 158-43-33

E-mail: mai@mai.ru

*Ду 25.08.2022*

Подпись Давыдова А.В. заверяю:

Заместитель начальника

Управления по работе с персоналом

Иванов М.А.

