

Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу **Нестерова Сергея Александровича** «Совершенствование моделей и конструкций поршневых электромеханических магнитожидкостных демпферов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты»

Актуальность темы. Одной из тенденций развития электромеханики является разработка специальных электрических машин и электромеханических устройств технологического назначения, в которых рабочим телом служат жидкие металлы, электролиты, дисперсные среды, технологические жидкости и др. Непосредственное электромагнитное воздействие на подобные рабочие тела позволяет существенно улучшить характеристики технологических процессов и повысить эффективность технологического оборудования. Диссертационная работа Нестерова С.А. посвящена разработке поршневых электромеханических магнитожидкостных демпферов (ЭМЖД), в которых в качестве рабочего тела используются магнитные жидкости. Поршневые ЭМЖД находят применение для снижения влияния вибраций в подвесках транспортных средств, сейсмозащите зданий и вантовых мостов, устройствах гашения колебаний трубопроводов, протезировании суставов и др. ЭМЖД преобразуют энергию линейных колебаний поршня в энергию вязкостной диссипации в магнитной жидкости при воздействии внешнего магнитного поля. При этом электромагнитное воздействие позволяет менять вязкость магнитной жидкости (более чем на порядок) и силу сопротивления демпфера, перестраивать амплитудно-частотную характеристику, управлять процессом гашения колебаний. Указанные достоинства делают ЭМЖД более эффективными, чем традиционные механические демпферы. Этим обусловлено увеличение интереса к разработке и применению ЭМЖД, что нашло отражение в резком росте за последние годы числа патентов и публикаций по данной тематике в ведущих промышленно развитых странах.

Широкое применение ЭМЖД во многом сдерживается отставанием в разработке теории таких устройств, что объясняется сложностью физических процессов в них. Характеристики ЭМЖД определяются взаимовлияющими электромагнитными, гидродинамическими и тепловыми процессами. При этом свойства активных материалов, применяемых в ЭМЖД, и, как следствие, сила сопротивления демпфера нелинейно зависят от магнитной индукции, температуры, скорости сдвига магнитной жидкости. Эти факторы, а также многообразие конструктивных решений ЭМЖД затрудняют построение математических моделей устройств. С учетом сказанного разработка уточненных расчетных моделей, исследование взаимосвязанных магнитных, гидродинамических и те-

пловых процессов, анализ силовых характеристик ЭМЖД, совершенствование их конструкций, составляющие задачи диссертации, несомненно актуальны.

Соответствие паспорту научной специальности. Работа ЭМЖД характеризуется взаимным преобразованием нескольких видов энергии и, в конечном счете, механической энергии колебаний в тепловую энергию. Однако ключевую роль в создании сил сопротивления демпфера играет электромагнитное воздействие на магнитную жидкость. Поэтому рассматриваемый в диссертации Нестерова С.А. объект исследования можно классифицировать, прежде всего, как электромеханическое устройство. Задачи и методы моделирования ЭМЖД, направления теоретических и экспериментальных исследований вполне соответствуют областям исследований, указанным в пунктах 1, 3, 5 паспорта специальности 05.09.01 - «Электромеханика и электрические аппараты». В связи с этим тема диссертации Нестерова С.А. соответствует данной научной специальности.

Структура диссертации и основные результаты разделов

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения и приложений, содержит список использованной литературы из 86 наименования. Структура и оформление диссертации соответствует требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации».

В введении обоснована актуальность темы диссертации, определены объект и предмет исследования. Сформулированы цель и задачи исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, их научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы.

В первой главе на основе патентно-библиографического обзора показано современное состояние разработок ЭМЖД, указаны достоинства и недостатки существующих конструкций и обоснован выбор поршневого ЭМЖД в качестве объекта исследования.

Показано, что применяемые в настоящее время аналитические модели ЭМЖД, основанные на допущении о полностью развитом течении магнитных жидкостей, не учитывают влияния на силу сопротивления демпфера многих факторов: индукции магнитного поля, температуры магнитной жидкости, нелинейности ее магнитореологических характеристик, напряжения начального сдвига, профиля скорости течения жидкости в канале демпфера. Обоснована необходимость при разработке математических моделей ЭМЖД осуществлять учёт взаимного влияния физических процессов.

Во второй главе рассмотрено аналитическое решение задачи напорного течения магнитной жидкости в щелевом канале поршневого ЭМЖД с учетом влияния магнитного поля на магнитореологические характеристики жидкости. Показано, что методики определения характеристик демпферов на жидкостях с постоянной вязкостью неприменимы для ЭМЖД. Предложен подход для расчёта силовых характеристик ЭМЖД, основанный на кусочно-линейной аппрок-

симации магнитореологической кривой магнитной жидкости. На основании такого подхода разработаны оригинальный алгоритм, итерационная процедура и автоматизированный комплекс расчёта для определения скорости движения поршня, соответствующей силе сопротивления ЭМЖД. Показано, что использование предложенных моделей позволяет повысить точность расчетов. В частности, при расчете ЭМЖД без учёта напряжения начального сдвига погрешность в определении усилия на начальном участке может достигать более 50%.

В то же время отмечена ограниченность аналитических моделей ЭМЖД: невозможность получения точного решения для каналов сложной формы, трудности учета взаимовлияния физических процессов.

Третья глава посвящена моделированию и исследованию поршневых ЭМЖД на основе метода конечных элементов с учетом взаимного влияния электромагнитного, гидродинамического, термодинамического полей на общей сетке. Взаимосвязь магнитных, гидродинамических и тепловых полей в ЭМЖД проявляется во влиянии параметров одних полей на характеристики сред и возбуждающие факторы других полей, что учтено в виде обратных связей.

При моделировании учитывались нелинейности магнитных характеристик стали магнитопровода и магнитной жидкости. Для учёта нелинейной вязкости магнитной жидкости использовано аналитическое выражение, коэффициенты которого задавались в виде зависимостей от величины магнитной индукции. Учтено влияние температуры на магнитореологические свойства МЖ.

Проведённые расчетные исследования магнитных, феррогидродинамических и тепловых процессов в ЭМЖД подтвердили их существенное взаимное влияние друг на друга. Например, по результатам взаимосвязанных расчетов полей показано, что при намагничивающей силе катушки возбуждения 350 А индукция магнитного поля в зазоре между поршнем и корпусом демпфера изменяется от 0,3 Тл (под полюсом) до 0,02 Тл (в межполюсном пространстве). Это приводит к соответствующему изменению вязкости магнитной жидкости от 2,8 кПа в областях с большей индукцией до 0,15 кПа в межполюсном пространстве. Выявлено влияние на магнитореологические характеристики жидкости и силы сопротивления ЭМЖД изменения скорости движения поршня и изменения температуры магнитной жидкости. Выполнено качественное сравнение силовых характеристик по результатам аналитического расчёта и конечно-элементного моделирования, показавшее, что конечно-элементная модель даёт некорректные результаты только при скорости движения поршня близкой к нулю, поскольку не учитывает начальное напряжение сдвига. Приведены примеры расчета силовых характеристик реального поршневого ЭМЖД.

Четвёртая глава работы посвящена разработке лабораторной установки для испытаний ЭМЖД, результатам их экспериментальных исследований и оценке путей совершенствования конструкции ЭМЖД.

Разработана и создана автоматизированная экспериментальная установка для испытаний ЭМЖД с использованием системы датчиков, интерфейсных плат ввода/вывода сигналов, работающих под управлением ЭВМ.

На опытной установке выполнено исследование влияния эффекта магнитной пружины, основанного на появлении сил магнитного тяжения при относительном перемещении полюсов поршня и корпуса. Показано, что силы сопротивления демпфера, обусловленные таким эффектом, соизмеримы с силами, определяемыми магнитореологическими свойствами жидкости, в случае применения поршня с ферромагнитными элементами. Отмечено, что использование эффекта магнитной пружины позволяет сформировать необходимую несимметричную силовую характеристику ЭМЖД, например, увеличить силу отбоя и уменьшить силу сжатия.

В ходе исследований предложены новые конструкции усовершенствованных поршневых ЭМЖД, защищенные патентами РФ на изобретения.

Сопоставление результатов экспериментальных исследований с расчетными данными подтвердило достоверность теоретических исследований, адекватность разработанных математических моделей. В то же время показана необходимость развития расчетных моделей с целью учета эффекта магнитной пружины, а также учета конструктивных особенностей новых конструкций поршневых ЭМЖД.

В заключении представлены основные выводы по результатам работы.

Новизна исследований и полученных научных результатов заключается в уточненном анализе с помощью современных методов электромагнитных, ферро-гидродинамических и тепловых процессов в ЭМЖД, позволяющем повысить точность прогнозирования силовых характеристик демпферов, в выявлении закономерностей влияния различных факторов на характеристики ЭМЖД, а также в разработке эффективных конструкций таких демпферов.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

- разработаны математические модели ЭМЖД, позволяющие учесть нелинейность магнитореологических характеристик магнитной жидкости и влияние на них магнитной индукции и температуры;
- предложены методики расчетов магнитных, гидродинамических и тепловых процессов в ЭМЖД на основе конечно-элементной модели, отличающиеся учетом их взаимного влияния;
- разработаны алгоритмы и программы расчетов силовых характеристик ЭМЖД, реализованные на основе анализа взаимосвязанных физических полей.

Наиболее существенные результаты диссертации, имеющие **практическую значимость**:

1. Выявлено существенное взаимное влияние магнитных, гидродинамических и тепловых процессов в ЭМЖД, и показана необходимость учета такого влияния при моделировании и исследованиях демпферов.

2. Разработаны уточнённые аналитические и численные математические модели ЭМЖД, методики, алгоритмы и программы расчетов силовых характеристик ЭМЖД. Алгоритмы и программы расчета ЭМЖД защищены двумя Свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

3. Разработан и создан опытный автоматизированный стенд для исследования ЭМЖД и выполнен цикл экспериментальных исследований характеристик ЭМЖД с изменяемой электромагнитным способом силой сопротивления. Результаты экспериментов позволили оценить эффекты, не учитываемые при расчетах, а также подтвердили достоверность теоретических выводов и адекватность разработанных математических моделей.

4. Показаны пути совершенствования конструкций ЭМЖД и предложены новые технические решения, защищенные патентами РФ на изобретения, позволяющие улучшить силовые характеристики демпферов за счет повышения эффективности использования магнитного потока.

Основные результаты диссертационной работы приняты к использованию в учебном процессе на кафедре «Электромеханика» по профилю «Электромеханика» в дисциплинах «Электромеханические магнитожидкостные устройства» и «Проектирование магнитожидкостных устройств», а также приняты к использованию в НПЦ «СплавТест», что подтверждено соответствующими Актами внедрения результатов диссертационной работы.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций. Достоверность полученных результатов обеспечена строгим выполнением математических преобразований, принятием признанных и обоснованных допущений, использованием современных математических моделей и лицензионного программного обеспечения, известных компьютерных систем моделирования. Адекватность результатов и выводов подтверждается согласованностью с известными результатами других авторов, хорошим совпадением экспериментальных результатов с результатами теоретических расчетов.

Полнота отражения результатов диссертации в опубликованных работах. Основные результаты диссертации опубликованы в 27 печатных работах, включая 4 статьи в изданиях, включенных в список ВАК, одну статью, индексированную в базах Web of Science и Scopus. Получены два свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и два патента РФ на изобретения. Анализ публикаций автора позволяет утверждать, что содержание диссертации отражено в них с требуемой Положением ВАК полнотой. Основные результаты работы прошли апробацию на целом ряде конференций.

Автореферат отражает содержание диссертации.

По работе имеются следующие замечания:

1. В диссертации рассматривается аналитическое решение задачи о течении магнитной жидкости в щелевом зазоре, которое мало связано с реальными конструкциями ЭМЖД. Следовало более четко обосновать принятые при таком решении допущения и уточнить области возможного применения представленной модели.

2. Почему в основу расчетов по аналитической и конечно-элементной моделям ЭМЖД положены разные магнитореологические характеристики? Такое различие сказалось на результатах расчетов, как это видно на рис. 3.21 диссертации и на рис.14 автореферата.

3. При оценке влияния температуры на процессы в ЭМЖД автор ограничился рассмотрением интервала времени 40 с. Соответствует ли это реальному времени работы ЭМЖД при различных его применениях? При анализе теплового состояния ЭМЖД представляет интерес оценка вклада электрических потерь в обмотке возбуждения. Такой оценки нет (возможно, из-за короткого интервала времени).

4. В разделе 3 рассматривается только одна конкретная конструкция ЭМЖД (с ферромагнитным поршнем и сплошным ферромагнитным корпусом). Почему не рассмотрены варианты такой конструкции с разными параметрами полюсной системы и не рассчитаны другие конструкции ЭМЖД (например, рассмотренные в экспериментальной части работы)? В итоге в теоретической части работы осталось без внимания такое важное явление, как эффект «магнитной пружины».

5. В выводах по разделу 3 отмечено, что с увеличением индукции магнитного поля в зазоре силу сопротивления ЭМЖД можно увеличить более, чем в 8 раз. Однако в самом разделе таких данных нет.

6. При расчетах по аналитической и конечно-разностной моделям ЭМЖД использован конкретный вариант магнитной жидкости. Экспериментальные исследования также выполнены для конкретного (но с другим составом и свойствами) варианта. Поэтому отсутствуют оценки влияния типов и свойств разных марок магнитной жидкости на изменение силовых характеристик демпферов.

7. В диссертации не описана конструкция и не указаны технические характеристики ЭМЖД, разработанного для предприятия – заказчика (НПЦ «СплавТест»).

8. Текст диссертации содержит отдельные опечатки и неточности:

- на рис. 2.4 и многих рисунках в Приложениях не обозначены оси координат;
- в формуле (2-19) разная размерность слагаемых;
- обозначения осей координат на рис. 2.2 и на рис. 2.6-2.8 не согласуются;
- не раскрыт смысл составляющей силы сопротивления F_{η} в спецификации к формулам 2.29-2.30;
- по результатам расчетов одного и того же ЭМЖД перепад давления на рис. 3.14 составляет десятки кПа, а на рис. 3.20 – сотни кПа, хотя силы сопротивления сопоставимы.

Заключение

Высказанные замечания не снижают значимости диссертационной работы, обобщающей весьма большой объем научных исследований. Задачи диссертации выполнены. В ходе исследований выявлены пути совершенствования конструкций поршневых ЭМЖД и направления развития их теоретических исследований. В целом диссертация Нестерова Сергея Александровича «Совершенствование моделей и конструкций поршневых электромеханических магнитожидкостных демпферов» представляет законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические решения проблемы, имеющей важное значение для развития электромеханики. Диссертация соответствует критериям п.п. 9-11 и 13-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утв. Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842), предъявляемым к кандидатской диссертации в области технических наук, а Нестеров Сергей Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 -Электромеханика и электрические аппараты.

Официальный оппонент,
профессор кафедры «Электротехника
и электротехнологические системы»
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
Университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина», д.т.н., профессор

Коняев Андрей Юрьевич

Дата составления отзыва: 25 января 2019 г.

Ф.И.О. оппонента, представившего отзыв: Коняев Андрей Юрьевич.
Почтовый адрес организации: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.
Адрес электронной почты: E-mail: a.u.konyaev@urfu.ru Тел. (343) 375-45-48

Полное наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра «Электротехника и электротехнологические системы»

Подпись Коняева Андрея Юрьевича заверена:

