

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.13, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 15 сентября 2017 года публичной защиты диссертации Храмцова Алексея Михайловича «Напряженно-деформированное состояние взаимодействующих элементов пьезоактюатора» по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

На заседании диссертационного совета присутствовали 20 из 26 членов диссертационного совета, из них 7 докторов наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела:

1.	Христенко Юрий Федорович, заместитель председателя диссертационного совета	д-р техн. наук	01.02.04
2.	Пикущак Елизавета Владимировна, ученый секретарь диссертационного совета	канд. физ.-мат. наук	01.02.05
3.	Архипов Владимир Афанасьевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
4.	Биматов Владимир Исмагилович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
5.	Бубенчиков Алексей Михайлович	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
6.	Бутов Владимир Григорьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
7.	Ворожцов Александр Борисович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
8.	Глазунов Анатолий Алексеевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
9.	Зелепугин Сергей Алексеевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
10.	Крайнов Алексей Юрьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
11.	Кульков Сергей Николаевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
12.	Люкшин Борис Александрович	д-р техн. наук	01.02.04
13.	Макаров Павел Васильевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
14.	Прокофьев Вадим Геннадьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
15.	Скрипняк Владимир Альбертович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
16.	Старченко Александр Васильевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
17.	Тимченко Сергей Викторович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
18.	Черепанов Олег Иванович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
19.	Шрагер Геннадий Рафаилович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
20.	Якутенок Владимир Альбертович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05

В связи с невозможностью присутствия на заседании председателя диссертационного совета, доктора физико-математических наук, профессора Гришина Анатолия Михайловича по его письменному поручению заседание провел заместитель председателя диссертационного совета, доктор технических наук, старший научный сотрудник Христенко Юрий Федорович.

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить А.М. Храмцову учёную степень кандидата физико-математических наук.

Заключение диссертационного совета Д 212.267.13
на базе федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»
Министерства образования и науки Российской Федерации
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук
аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 15.09.2017, № 321

О присуждении **Храмцову Алексею Михайловичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Напряженно-деформированное состояние взаимодействующих элементов пьезоактюатора»** по специальности **01.02.04** – Механика деформируемого твердого тела принята к защите 16.06.2017, протокол № 312, диссертационным советом Д 212.267.13 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012).

Соискатель **Храмцов Алексей Михайлович**, 1989 года рождения.

В 2011 году соискатель окончил государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный институт электронной техники (технический университет)».

В 2017 году соискатель очно окончил аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Работает в должности начальника лаборатории разработки и производства многослойных пленочных пьезокерамических преобразователей в Акционерном обществе «Научно-исследовательский институт «Элпа» (г. Зеленоград); по совместительству – в должности ведущего инженера лаборатории 23 Научно-исследовательского института прикладной математики и механики

в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре механики деформируемого твердого тела физико-технического факультета и в лаборатории 23 Научно-исследовательского института прикладной математики и механики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, **Пономарев Сергей Васильевич**, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», лаборатория 23 Научно-исследовательского института прикладной математики и механики, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Радченко Андрей Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», институт кадастра, экономики и инженерных систем в строительстве, директор

Уцын Григорий Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра механики и графики, доцент

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)**», г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном **Борзовым Андреем Борисовичем** (доктор технических наук,

Научно-исследовательский институт специального машиностроения, заместитель директора) и **Бошляковым Андреем Анатольевичем** (кандидат технических наук, кафедра «Робототехнические системы и мехатроника», доцент), указала, что актуальность темы исследования обусловлена все более широким применением пьезоактюаторов в различных областях техники и технологий. При работе пьезоактюаторов в быстродействующих высокоточных системах важно соответствие расчетных и реальных параметров. Моделирование напряженно-деформированного состояния пьезокерамических устройств является сложной задачей ввиду анизотропии упругих свойств материала, возникающих в нем пиро- и пьезоэффектов, а также большого разнообразия материалов с разными свойствами у разных производителей. Тематика диссертационной работы А.М. Храмцова, связанная с изучением динамических режимов работы пьезоактюатора с инерционной нагрузкой, соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники и Перечню критических технологий Российской Федерации, утвержденным Указом Президента РФ от 07.07.2011 № 988. А.М. Храмцовым проведен анализ существующих математических методов моделирования динамических режимов работы пьезоактюатора; рассмотрены методы измерений электрических и механических параметров многослойных пьезопакетов; впервые сформулированы математические модели динамического взаимодействия составных частей корпуса пьезоактюатора и учитывающих инерционную массу нагрузки; проведены расчеты напряженно-деформированного состояния взаимодействующих элементов конструкции пьезоактюатора во всех режимах работы, включая переходные процессы при пуске и остановке системы; разработана трехмерная конечно-элементная модель колебательной системы линейного пьезопривода при помощи программного комплекса Ansys, при помощи которой был произведен подбор эффективных контактных механических пар конструкции пьезоактюатора и получены частотные характеристики актюатора при работе на различные инерционные нагрузки; экспериментально подтверждены результаты моделирования резонансных режимов работы пьезоактюатора под нагрузкой. Разработанные математические модели могут быть использованы для создания различных типоминалов пьезоприводов, начиная с этапа эскизного проектирования.

Использование результатов работы позволяет сократить затраты времени и материалов при изготовлении опытных партий образцов, что в значительной степени удешевляет разработку новых изделий. Предложенные соискателем решения могут быть применены при разработке систем прецизионного позиционирования на основе многослойных пьезокерамических актюаторов линейного типа российского и зарубежного производства. Результаты работы имеют существенное значение для всех организаций, занимающихся разработкой, производством и эксплуатацией аналогичного оборудования.

Соискатель имеет 17 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 17 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 2, патент Российской Федерации – 1, статей в зарубежных электронных изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus – 3, монография – 1, публикаций в сборниках материалов международных и всероссийской научных, научно-технической и научно-практической конференций и симпозиума – 10. Общий объем публикаций – 11,74 п.л., личный вклад автора – 1,86 п.л.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значительные работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Азин А. В. Математическое моделирование режимов работы пьезодвигателя / А. В. Азин, С. В. Пономарев, С. В. Рикконен, **А. М. Храмцов** // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2016. – № 6 (44). – С. 45–53. – DOI: 10.17223/19988621/44/4. – 0.41 / 0.10 п.л.

2. Азин А. В. Экспериментальные исследования режимов работы пьезоактюатора / А. В. Азин, С. В. Пономарев, С. В. Рикконен, **А. М. Храмцов** // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2017. – № 45. – С. 60–68. – DOI: 10.17223/19988621/45/5. – 0.30 / 0.10 п.л.

Статья в зарубежном электронном издании, индексируемом Web of Science and Scopus:

3. **Khramtsov A. M.** High-temperature piezoelectric materials for elements of linear piezo motors [Electronic resource] / A. M. Khramtsov, A. I. Spitsin, A. G. Segalla, S. V. Ponomarev, S. V. Rikkonen // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1783, is. 1 : International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2016. Tomsk, Russia, September 19–23, 2016. – 4 p. – URL: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4966380> (access date: 01.03.2017). – DOI: 10.1063/1.4966380. – 0.25 / 0.06 п.л.

На автореферат поступило 6 положительных отзывов. Отзывы представили:

1. **М. А. Дмитриева**, д-р физ.-мат. наук, доц., профессор кафедры градостроительства, землеустройства и дизайна Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта, г. Калининград, *с замечанием*: в описании третьей главы диссертации отсутствует анализ результатов, полученных методом электрических аналогий.
2. **В. Н. Лейцин**, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий лабораторией фундаментального и прикладного материаловедения Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта, г. Калининград, *с замечанием* об отсутствии расчетных и экспериментальных данных для большего числа номиналов инерционных масс, действующих на пьезоактюатор.
3. **А. М. Малышенко**, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры систем управления и мехатроники Национального исследовательского Томского политехнического университета, *с замечаниями*: некорректно отнесено к новым научным результатам (научной новизне) создание испытательного стенда, позволяющего проводить электромеханические испытания конструкций пьезоактюаторов; представленная на рис. 2.3 зависимость некорректно названа на стр. 11 амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), что не соответствует уже устоявшемуся понятию АЧХ в теории динамических систем; в тексте присутствуют стилистические и пунктуационные ошибки.
4. **К. Е. Каменцев**, канд. техн. наук, доцент кафедры нанoeлектроники Московского технологического университета (МИРЭА), *с замечаниями*: несмотря на то, что на странице 7 специально отмечено явление гистерезиса пьезоактюатора, в дальнейшем анализ ведется только в линейном приближении; рисунок 2.6 на странице 13 несколько перегружен,

трудно читаются подписи на осях графиков; при анализе составных пьезоактюаторов и сравнении расчетных параметров с экспериментом автор пренебрегает проводимостью тонких пьезоэлектрических слоев. 5. **Р. Д. Тихонов**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела микросистемной техники Научно-производственного комплекса «Технологический центр», г. Москва, *с замечанием*: недостаточно подробно описаны расчеты в программном комплексе Ansys с фрагментами программного кода для проверки корректности решений поставленных задач. 6. **А. А. Буш**, д-р техн. наук, доц., директор Научно-исследовательского института материалов твердотельной электроники Московского технологического университета (МИРЭА), *с замечанием*: на итоговом графике (Рис. 4.3) не хватает расчетных значений амплитуд для пиковых значений, полученных в ходе эксперимента.

В отзывах отмечается, что актуальность диссертационного исследования А.М. Храмцова связана с проблемой разработки сложных пьезокерамических структур, используемых в качестве исполнительных элементов в системах прецизионного позиционирования. А.М. Храмцовым сформулированы математические модели динамических режимов работы пьезоактюатора при воздействии инерционной нагрузки; рассчитаны резонансные режимы работы и переходные процессы пуска и остановки пьезоактюатора; разработаны схемы расчетов трехмерной конечно-элементной модели пьезоактюаторов производства АО «НИИ «Элпа» с помощью современного программного комплекса Ansys и программы MathCAD; разработан и изготовлен испытательный стенд для верификации результатов математического моделирования резонансных режимов работы пьезоактюатора под нагрузкой. Результаты исследования А.М. Храмцова вносят вклад в разработку экспериментальной аппаратуры с использованием пьезоактюаторов для исследований деформации твердого тела, в математическое моделирование ее работы и могут быть применены при разработке ряда пьезодвигателей отечественного производства для систем прецизионного позиционирования, для расчета различных пьезокерамических материалов и конструкций пьезоактюаторов. Предложенные А.М. Храмцовым методики расчета обеспечивают существенное снижение трудоемкости и сокращение технологических потерь при разработке и производстве опытных партий пьезоэлементов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **А.В. Радченко** является известным специалистом в области механики деформируемого твёрдого тела, в сферу научных интересов которого входят вопросы моделирования конструкций при механическом взаимодействии методом конечных элементов; **Г.Е. Уцын** является специалистом, область научных интересов которого включает исследование волновых процессов в неоднородных средах применительно к проблемам диагностики диэлектрических сред; **Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)** известен своими исследованиями и разработками военной и космической техники, в том числе современных двигателей и датчиков на основе пьезоэлектрических материалов и методов анализа поведения таких конструкций при механических и тепловых воздействиях.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана одномерная математическая модель околорезонансного взаимодействия элементов пьезоактюатора с учетом нагрузки для определения резонансных режимов работы системы при проектировании;

разработан уникальный испытательный стенд с источником питания для экспериментальных исследований, позволяющий проводить электромеханические испытания элементов из пьезокерамики при действии инерционной нагрузки;

решена электроупругая задача деформирования системы активно взаимодействующих элементов конструкции с численным моделированием переходных процессов работы пьезоактюатора;

получены экспериментальные частотные характеристики работы пьезоактюатора при воздействии инерционной нагрузки, которые подтверждают, что предлагаемые математические модели правильно отражают физику процесса работы колебательной системы пьезоактюатора;

установлено, что частотные характеристики вибросмещения, полученные трехмерным и одномерным моделированием, имеют расхождение с экспериментом не более 15 %;

найжены оптимальные материалы контактных механических пар конструкции пьезоактюатора;

рассчитаны частотные характеристики вибросмещения пьезоактюатора при воздействии инерционной нагрузки и переходные процессы работы пьезоактюатора.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

разработаны математические модели, позволяющие определять параметры многослойного пьезоактюатора при работе на заданную нагрузку в статическом и динамическом режимах с погрешностью не более 15 %;

получены результаты, раскрывающие механизмы взаимодействия составных частей пьезоактюатора и являющиеся важным вкладом в развитие прецизионных систем позиционирования на основе пьезоэффекта;

разработана методика решения задачи о напряженно-деформированном состоянии взаимодействующих элементов конструкции пьезоактюатора во всех режимах работы, включая переходные процессы при пуске и остановке системы.

Значение полученных соискателем результатов исследований для практики подтверждается тем, что:

предложена вычислительная модель, позволяющая определять резонансные режимы в конструкции пьезоактюатора на этапе эскизного проектирования, учитывающая взаимодействие элементов конструкции, что обеспечивает существенное снижение трудоемкости и сокращение технологических потерь при разработке и производстве опытных партий пьезоэлементов;

создан испытательный стенд, позволяющий получать экспериментальные данные о динамических режимах работы пьезоактюатора, что представляет интерес для применения указанных материалов в инженерной практике.

Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования. Разработанная в диссертации математическая модель может использоваться при решении широкого круга задач, связанных с моделированием динамических режимов работы систем нано- и микропозиционирования, основанных на пьезоэффекте. Разработанный испытательный стенд может быть использован для проведения электромеханических испытаний пьезоактюаторов отечественного и зарубежного производства. Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для применения на предприятиях, в образовательных учреждениях и академических институтах, таких как Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Элпа» (г. Москва), Южный федеральный университет (г. Ростов-на-Дону), Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Московский технологический университет (МИРЭА) и др.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для решения задач использованы хорошо апробированные численные методы, экспериментальные методики, аппарат программного конечно-элементного моделирования в применении к пьезоэлектрическим структурам, методы математического моделирования физических процессов в твердотельных сегнетоэлектрических структурах;

правильность данных численного анализа подтверждается обоснованностью и корректностью физико-математических постановок задач, применением апробированных экспериментальных методик и сертифицированного оборудования;

проведены экспериментальные исследования на специально разработанном испытательном стенде, полученные данные обрабатывались с использованием методов математической статистики;

проведено сравнение полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными, показавшее, что расхождение расчетных значений с экспериментальными составляет менее 15 %.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в предложенном методе определения прочностных и конструктивно технологических параметров исполнительных элементов пьезопроводов, учитывающем взаимодействие элементов колебательной системы, включающей пьезоактюатор и нагрузку. В рамках диссертационного исследования была впервые решена задача о напряженно-деформированном состоянии взаимодействующих элементов конструкции пьезоактюатора во всех режимах работы, включая переходные процессы при пуске и остановке системы. С использованием разработанных моделей и алгоритмов были проведены численные исследования, в результате которых впервые был установлен характер взаимодействия составных частей пьезоактюатора. Также был создан

испытательный стенд, позволяющий проводить электромеханические испытания конструкций пьезоактюаторов, включая конструкции с использованием отечественной пьезокерамики, производимой по пленочной технологии.

Личный вклад соискателя состоит в: получении основных численных результатов, выносимых на защиту; разработке методик моделирования; проведении экспериментальных и численных исследований; анализе и интерпретации результатов; разработке экспериментального стенда; осуществлении совместно с научным руководителем постановки всех задач диссертации; обсуждении результатов исследования; формулировке выводов и заключений по материалам исследований; подготовке основных публикаций по теме диссертации.

Диссертация отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и, в соответствии с пунктом 9 Положения, является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи о напряженно-деформированном состоянии взаимодействующих элементов конструкции пьезоактюатора, имеющей значение для развития микромеханики, робототехники, механики деформируемого твердого тела.

На заседании 15.09.2017 диссертационный совет принял решение присудить **Храмцову А.М.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 7 докторов наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета

15.09.2017



Христенко Юрий Федорович

Пикушак Елизавета Владимировна