

## ОТЗЫВ

### официального оппонента о диссертационной работе

Ошмарина Дмитрия Александровича «Моделирование демпфирования колебаний smart-систем на основе пьезоэлектрических материалов и электрических элементов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8– Механика деформируемого твёрдого тела

Тема диссертационной работы Ошмарина Д.А. является актуальной, имеет научную и практическую значимость и посвящена разработке теоретических основ создания современных smart-конструкций со встроенными пьезоэлектрическими элементами и совершенствованию систем управления динамическими процессами - демпфированием колебаний конструкций с использованием внешних электрических цепей различных конфигураций и выявлению оптимальных режимов функционального взаимодействия пьезоэлектрических информационных и исполнительных элементов - сенсоров и актуаторов системы управления, самоадаптации и настройки резонансных частот к изменяющимся условиям внешних динамических воздействий.

Целью данной работы является выявление и изучение закономерностей влияния на диссипативные свойства колеблющихся smart-конструкций характеристик присоединенных к поверхности конструкции (консоли) пьезоэлементов с внешней замкнутой электрической RCL-цепью из резистивных (R), емкостных (C) и индуктивных (L) элементов.

Наличие внешней электрической цепи и ее «настройка» (т.е. нахождение ее оптимальных конфигураций и характеристик) обуславливает функционирование присоединенного к конструкции пьезоэлемента одновременно и в качестве датчика - генератора информативных

электрических сигналов и актуатора – силового воздействия на конструкцию для «активного» гашения колебаний.

Характеристика структуры и содержание работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения и списка из 179 литературных источников. Общий объем диссертации составляет 139 страниц.

Во введении приводится общая информация о проблематике исследования, ее актуальности и степени проработанности. Обосновывается актуальность, теоретическая и практическая значимость темы исследования. Формулируются цель и задачи диссертационной работы, методы исследования и научная новизна с обоснованием достоверности полученных результатов и личным вкладом автора, а также положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации результатов и о структуре диссертации.

В первой главе дана общая математическая вариационная постановка стационарной задачи о колебаниях кусочно-однородных пьезоэлектровязкоупругих тел с внешними электрическими цепями различной RLC-конфигурации.

Вторая глава посвящена построению и апробации алгоритма численного решения задачи о собственных и вынужденных стационарных колебаниях пьезоэлектровязкоупругих тел с внешними электрическими RLC-цепями с использованием метода конечных элементов.

Третья глава посвящена разработке алгоритма и примерам численной реализации выбора оптимальных вариантов размещений пьезоэлементов на поверхности smart-конструкций на основе анализа распределений поверхностных деформаций, электрического потенциала и значений коэффициента электромеханической связи.

Четвертая глава посвящена разработке алгоритма и примерам численной реализации выбора оптимальных конфигураций внешней электрической цепи для эффективного моно- и мультимодального демпфирования колебаний smart-конструкций.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационного исследования, выносимые на защиту.

Стиль изложения, оформление работы. Изложение материала работы ясное, формулы, рисунки и графики, в основном, оформлены аккуратно, библиографический список удовлетворителен и соответствует современному состоянию вопросов исследования.

Обоснованность применяемых методик и достоверность полученных результатов подтверждена обоснованностью и корректностью используемых новых математических постановок рассматриваемых задач, использованием для их решения апробированных численных реализаций и алгоритмов метода конечных элементов, численными результатами асимптотической сходимости решения при увеличении степени дискретизации и решением тестовых задач с использованием других численных методов.

Научную новизну диссертационной работы Ошмарина Д.А. составляют полученные им результаты, выносимые на защиту:

новый вариант математической вариационной постановки связанной краевой задачи электровязкоупругости о собственных и вынужденных установившихся колебаниях кусочно-однородного тела, включающего в себя пьезоэлектрическую и, в общем случае, вязкоупругую подобласти, с учетом наличия внешней замкнутой электрической цепи и энергетических потерь;

новый конечно-элементный алгоритм численной реализации решения поставленной задачи с использованием подпрограмм коммерческого пакета конечно-элементного анализа ANSYS;

новый алгоритм поиска оптимальных значений параметров рассматриваемых smart-систем на примере достижения максимального демпфирующего эффекта при свободных и вынужденных колебаниях консоли;

новый способ демпфирования колебаний с использованием дополнительного электропроводного слоя (покрытия) для расширения частотного спектра, в частности, мультимодального демпфирования.

Личный вклад автора Ошмарина Д.А. заключается в разработке математической постановки задачи (совместно с научным руководителем); разработке алгоритма, позволяющего извлекать из конечно-элементного пакета ANSYS глобальные ансамблированные матрицы жесткости, масс и матрицы для электрической цепи для произвольной конструкции; разработке и реализации соответствующих программ на ЭВМ; проведение вычислений и анализ результатов.

Публикация и апробация работы. По теме диссертации опубликовано 48 работ, в том числе 11 статей в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 2 статьи в виде глав коллективных монографий.

Основные результаты исследований апробированы на большом количестве (20-ти) научных всероссийских и международных конференциях, перечень которых приведен во введении, и на различных научных семинарах.

Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертации, основные идеи и выводы работы.

Замечания по диссертационной работе:

1. Почему не учитывалась и может ли быть учтена электрическая проводимость пьезоэлектрика, обуславливающая релаксацию в нем электрического поля, например, при «холостом режиме»?
2. Прошу пояснить (см. раздел 3.1), почему принято, что на пьезоэлемент наиболее сильное влияние оказывает нормальная к поверхности «подложки» (консоли) осевая деформация  $\varepsilon_{zz}$ ? (а не «поверхностные» осевые  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$  и сдвиговая  $\gamma_{xy}$  деформации «подложки»), если пластинчатый пьезоэлемент с поляризацией по толщине (ось  $z$ ) присоединен (приклеен) к поверхности (в плоскости  $x, y$ , см. рис.3.2) консольной балки (см. рис.3.1).
3. Почему для анализа в диссертационной работе выбран актуатор в виде пластинчатого пьезоэлемента с поляризацией по толщине, а не с поляризацией в плоскости поверхности присоединения к конструкции, например, как в известном «MFC actuator»: <https://www.smart-material.com/MFC-product-mainV2.html>
4. Осуществлена ли оценка энергетических потерь при работе пьезоэлемента в режиме «короткого замыкания»?
5. Является ли режим «короткого замыкания» (как предельный случай) оптимальным для процесса демпфирования колебаний по сравнению с использованием других RLC-внешних цепей?
6. Возможно ли автономное (без участия оператора) переключение различных электродированных участков (см. рис.4.18) для различных мод колебаний?
7. На стр. 48 в верхней формуле для компонент матрицы жесткости [ $C_n$ ] три опечатки, во-первых, не хватает множителя  $\frac{1}{2}$  перед выражением для модуля сдвига  $C_{44} = C_{1212} = 1/2(C_{11} - C_{12})$  в плоскости изотропии, а

- на месте компонент  $C_{55}$ ,  $C_{66}$  вместо величин  $C_{44}$ ,  $C_{44}$  надо написать  $C_{55}$ ,  $C_{55}$ .
8. В двух местах на стр.39 ниже формулы (1.36) и на стр. 41 ниже формул (1.43) из замены переменной вида  $\tau = t-s$  автор записывает, как следствие, равенство  $d\tau = ds$  вместо правильной записи  $d\tau = - ds$ . Требуется ли корректировка знака в этой группе формул (1.44) – (1.47) (см. стр.39 - стр.42) ?
  9. В работе автор принимает (см. текст ниже формулы (1.14)), что тензор пьезоэлектрических свойств  $\beta_{ijn}$  третьего ранга симметричен по «первому и второму» индексам. Однако, далее (см. стр.48) для матричных обозначений индексов этого тензора используется другая (общепринятая) схема расположения индексов (например, в виде  $\beta_{15}$ ) с симметрией по второму и третьему индексам этого тензора.
  10. На стр.73 автор пишет равенство  $\beta_{51} = \beta_{42}$ , однако правильно  $\beta_{51} = \beta_{62}$  с учетом принятой (см. (2.2)) замены индексов:  $11 \rightarrow 1$ ,  $22 \rightarrow 2$ ,  $33 \rightarrow 3$ ,  $12, 21 \rightarrow 4$ ,  $13, 31 \rightarrow 5$ ,  $23, 32 \rightarrow 6$  при тензорном и матричном обозначениях.
  11. Раздел 1.2. «Вариационное уравнение для пьезоэлектрического тела» (стр.29 – стр.38) состоит из подробного вывода (более чем на 3-х страницах (1.7)-(1.19)) известных физических соотношений (1.19) и известного вида вариационного уравнения (1.31) для пьезоэлектрика.
  12. В комментарии ниже формулы (1.28) использован некорректный термин «разваливается».
  13. На стр. 24 опечатка в предложении «Достоверность полученных результатов...».
  14. Отсутствует «горизонтальная черта» над обозначениями комплексных амплитуд в тексте на стр.29, в формулах (1.40) на стр.40, в формулах (1.47) на стр.42.
  15. На стр.108 опечатка в названии раздела 4.3 «Мультимодальное ....».
  16. На стр.115 термин «магазин резисторов» приводится без кавычек.

17. На стр.54 перед формулой (2.18) опечатка в номере ссылки на формулу (2.14) (т.к. правильно - (2.15)).

18. Многозначность обозначения  $\delta$ , которое используется как вариация (например, формулы (1.31) ), матрица неизвестных (см. стр.61 формула (2.39)) и отношение мнимой части к действительной (см.стр.74).

Указанные замечания, в целом, носят характер уточнений и пожеланий и не влияют на общую положительную оценку данной работы, выполненной на мировом научном уровне.

### **Общее заключение по работе.**

Диссертация Ошмарина Дмитрия Александровича представляет собой законченную научно-квалификационную работу.

Положения, вынесенные на защиту, достоверны и хорошо обоснованы апробацией применяемых методик и достоверностью полученных диссертантом результатов и не вызывают возражений.

Оформление и структура автореферата дает ясное представление о целях, методах, результатах и перспективах исследования.

Работа выполнена самостоятельно на высоком научном уровне.

Полученные результаты являются новыми, актуальными и имеют высокую научную и практическую значимость.

Результаты диссертационной работы в полной мере представлены в публикациях и обсуждены на всероссийских и международных конференциях.

Принимая во внимание все вышесказанное, считаю, что диссертационная работа «Моделирование демпфирования колебаний smart-систем на основе пьезоэлектрических материалов и электрических элементов» удовлетворяет всем требованиям пункта 9 «Положения и присвоение ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842 (с изменениями согласно постановлению Правительства Р Ф от 21.04.2016 №335), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Ошмарин Дмитрий Александрович, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8– Механика деформируемого твёрдого тела.

Официальный оппонент,

профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,  
доктор физико-математических наук по специальности 01.02.04– Механика деформируемого твёрдого тела.

Паньков Андрей Анатольевич

 / А.А. Паньков

Подпись А.А.Панькова заверяю:

Ученый секретарь  
Ученого совета ПНИИУ





/ В.И. Макаревич

« 28 » ноября 2015 г.