

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Ошмарина Дмитрия Александровича

"Моделирование демпфирования колебаний smart-систем на основе пьезоэлектрических материалов и электрических элементов", представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – механика деформируемого твёрдого тела

Актуальность избранной темы. Проблема создания smart-материалов является ключевой при разработке систем контроля и управления адаптивными конструкциями. Изделия из smart-материалов широко применяются при создании smart-систем либо в качестве датчиков или чувствительных элементов, способных регистрировать контролируемые параметры, либо в качестве исполнительных элементов систем активного воздействия. Одним из наиболее востребованных направлений использования smart-материалов являются системы управления динамическими процессами в механических конструкциях, в частности, подавление нежелательных резонансных явлений или паразитных мод колебаний, возникновение которых в большинстве случаев негативно сказывается на эксплуатационных характеристиках конструкций. Актуальным в этом случае является использование smart-материалов, выполненных из пьезоэлектрических материалов, в сочетании с дискретными электрическими элементами в виде резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается использованием строгих математических моделей для описания колебаний электроупругих тел, включая теорию краевых задач линейной теории электроупругости. Развитые в работе прикладные теории построены на основе вариационных принципов механики сплошных сред с использованием метода Галеркина и проверены путем сравнения результатов, полученных при проведении сравнительных численных экспериментов, с результатами, полученными другими методами.

Научная и практическая значимость заключается в новой математической постановке задачи о собственных колебаниях кусочно-однородных электровязкоупругих тел с внешними электрическими цепями. Практическая значимость работы состоит в разработанных алгоритмах решения задач о собственных и о вынужденных установившихся колебаниях smart-систем, представляющих собой упругие и вязкоупругие тела с пьезоэлементами и дискретными элементами электрических цепей, которые позволяют найти параметры системы, обеспечивающие максимальное влияние.

Содержание диссертационной работы. При оценке содержания диссертационной работы в первую очередь необходимо отметить, что работа представляется добротным и качественным исследованием, проведенным на основе хорошо продуманного плана с использованием разнообразного современного математического и вычислительного

инструментария. Цель работы и задачи, решение которых необходимы для ее достижения, четко сформулированы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы, содержащего 179 наименований. Объем диссертации 139 стр. Иллюстративный материал включает 53 рисунка и 10 таблиц.

Во введении приводится достаточно подробный обзор имеющихся публикаций по теме диссертации, формулируются цели и задачи диссертационного исследования, приводятся основные выносимые на защиту положения, указывается новизна и практическая значимость, а также обосновывается достоверность полученных результатов.

В первой главе излагаются основные положения теории электроупругости, граничные условия и описывающих математическую постановку задачи о колебаниях кусочно-однородных электровязкоупругих тел с внешними электрическими цепями. Определяются объекты исследования в виде кусочно-однородных электроупругих тел, к электродированным поверхностям которых могут быть присоединены внешние электрические цепи различной архитектуры, состоящие из резисторов, емкостей и индуктивностей. Вывод вариационного уравнения динамического деформирования пьезоэлектрических элементов осуществляется с использованием метода Галеркина. Вывод вариационных уравнений для элементов внешней электрической цепи (резистор с сопротивлением R , конденсатор с емкостью C , катушка индуктивности с индуктивностью L) осуществляется на основе известных соотношений теории электрических цепей с помощью уравнения Лагранжа. В целом глава закладывает строгую математическую базу для корректного описания динамических процессов в электроупругих средах.

Во второй главе проводится построение алгоритма численной реализации задачи о колебаниях электровязкоупругих тел с элементами электрической цепи методом конечных элементов. Представлен вывод конечно-элементных соотношений для электроупругой среды, приведен общий вид используемого конечного элемента в локальной и глобальной системах координат, приведены соотношения для конечного элемента, а также выражения для формирования матриц жесткости и масс. Для моделирования внешней электрической цепи предложен новый вариант обобщенного двухузлового конечного элемента, представляющего собой параллельное соединение резистивного, индуктивного и емкостного элементов. Приводятся выражения для формирования конечно-элементной и глобальной матриц жесткости для предлагаемого элемента, а также уравнения, описывающие процедуру формирования глобальных матриц жесткости, масс и векторов узловых усилий.

Третья глава диссертационной работы посвящена выбору оптимальных вариантов компоновки упругих тел пьезоэлементами. Предложен алгоритм поиска оптимальной конфигурации упругой системы с пьезоэлементом на основе результатов решения задачи о собственных колебаниях кусочно-однородных электроупругих тел. Подбор оптимальной компоновки системы пьезоэлементами осуществлен на основе анализа распределения полей деформаций в конструкции. Приведены результаты численных расчетов по подбору

оптимального места расположения пьезоэлемента на примере конструкции, представляющей собой тонкостенную оболочку в форме полуцилиндра.

В четвертой главе диссертационной работы приводятся результаты решения ряда конкретных задач о собственных и о вынужденных установившихся колебаниях кусочно-однородных электроупругих тел для оценки диссипативных свойств smart-систем на основе пьезоэлементов и дискретных электрических элементов путем выбора параметров элементов электрических цепей, обеспечивающих максимальное демпфирование колебаний. В качестве вариантов внешних электрических цепей рассмотрены наиболее распространенные схемы: резистивная цепь (один резистивный элемент) и резонансная электрическая цепь (последовательно или параллельно соединенные резистивный и индуктивный элемент). При этом учитываются емкостные свойства пьезоэлемента. В этой же главе исследованы возможности использования графеновых композитов в качестве smart-материалов. Проведенный анализ показал, что использование свойств электрической проводимости графеновых композитов дает дополнительные возможности при демпфировании колебаний.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные научные результаты:

1. Математическая постановка задач о собственных и о вынужденных установившихся колебаниях кусочно-однородных электровязкоупругих тел с внешними электрическими цепями различной конфигурации.
2. Алгоритм численной реализации предложенной математической постановки задач о колебаниях электровязкоупругих тел с использованием подпрограмм из пакета прикладных программ конечно-элементного анализа ANSYS.
3. Численные результаты решения задачи о собственных колебаниях кусочно-однородных электровязкоупругих тел с внешними электрическими цепями.
4. Алгоритм компоновки вязкоупругих тел пьезоэлементами, обеспечивающий максимальные электромеханические свойства электровязкоупругого тела.
5. Результаты поиска параметров smart-систем на основе пьезоэлементов и элементов электрических цепей с максимальными демпфирующими свойствами при свободных и вынужденных колебаниях.
6. Вариант smart-систем на основе пьезоэлементов и электропроводящих деформируемых материалов, демонстрация его возможностей для дополнительного демпфирования, в том числе — мультимодального демпфирования.

Новизна полученных результатов связана с новым вариантом математической постановки задачи о собственных и вынужденных установившихся колебаниях кусочно-однородных электровязкоупругих тел с внешними пассивными электрическими цепями различной конфигурации, с разработкой конечно-элементного алгоритма численной

реализации рассматриваемых задач на основе использования подпрограмм коммерческого пакета конечно-элементного анализа ANSYS. В диссертации предложен алгоритм поиска параметров smart-систем на основе пьезоэлементов, обеспечивающих ее максимальные электромеханические характеристики, продемонстрированы возможности задач о собственных и вынужденных установившихся колебаниях для поиска вариантов smart-систем на основе пьезоэлементов и элементов электрических цепей с максимальными демпфирующими свойствами при свободных и вынужденных колебаниях.

Значимость основных результатов для науки и практики и рекомендации по их использованию

Теоретическая значимость работы заключается в новой математической постановке задачи о собственных колебаниях кусочно-однородных электровязкоупругих тел с внешними электрическими цепями. Практическая значимость работы состоит в разработанных автором алгоритмах решения задач о собственных и о вынужденных установившихся колебаниях smart-систем, представляющих собой упругие и вязкоупругие тела с пьезоэлементами и элементами электрических цепей, которые позволяют найти параметры системы, обеспечивающие максимальное влияние.

Публикации, отражающие основное содержание работы. Результаты по теме диссертации опубликованы в 48 работах, в том числе 11 статей в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 2 статьи в виде глав в коллективных монографиях, 20 статей в прочих журналах, сборниках научных трудов и материалах конференций; 15 работ — в виде тезисов конференций. Основные результаты работы достаточно полно апробированы и докладывались на российских и международных научных конференциях различного уровня.

Замечания по диссертационной работе:

1. В заключении автор отметил, что "представленный алгоритм применим к кусочно-однородным вязкоупругим телам произвольной геометрии, к которым присоединены электрические цепи произвольного типа". В то же время в диссертации рассмотрены тела лишь в виде пластин и оболочек. Возможно ли использованием предложенных подходов к стержневым конструкциям?

2. В качестве исполнительных элементов системы управления в диссертации используются пьезоэлементы в виде пластин, оптимальным местом расположения которых выбираются "области конструкции с наибольшими средними деформациями". При этом вопросы прочности этих пластин не обсуждаются, хотя известно, что пьезокерамика переносит сжатие, но не допускает растяжения.

3. На стр. 104, 107 и 121 при описании рисунков отмечено, что "синим цветом...., красным цветом обозначены кривые ", хотя все иллюстрации выполнены в оттенках серого. Отсутствие цветных иллюстраций существенно снижает восприятие графического материала диссертации. Указанные замечания ни в коей мере не умаляют значение проделанной работы и не влияют на ее общую положительную оценку. Они могут

