

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»,
академик РАН



Пешехонов В.Г.

2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – ГНЦ РФ АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор" –
на диссертационную работу Лукина Алексея Вячеславовича
«Нелинейная динамика и устойчивость упругих элементов нано- и
микросистемной техники в связанных полях»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела»

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена интенсивным развитием нано- и микросистемной техники в применении к прикладным задачам приборостроения, в частности, в области гироскопии и навигации. Проблемы, возникающие при разработке и моделировании нано- и микроэлектромеханических систем, требуют для своего решения применения сложных механических моделей, современных вычислительных методов, а также математического аппарата аналитической механики, теории колебаний и устойчивости, теории упругости и других смежных дисциплин. Особые трудности представляет детальный учет факторов, связанных с мультидисциплинарной (мультифизичной) природой рассматриваемых инженерных задач, т.е. с необходимостью совместного исследования механических, электрических, магнитных, тепловых, гидродинамических процессов, имеющих место в эксплуатационных режимах работы микромеханических датчиков и актуаторов. Таким образом, на данный момент существует потребность в разработке вычислительно эффективных методов

моделирования и проектирования, которые объединяли бы в себе преимущества аналитических и численных методов расчета динамических процессов в объектах нано- и микросистемной техники с учетом сложных взаимодействий между физическими полями различной природы.

Основные научные результаты, полученные автором:

1) получены аналитические и численные решения ряда статических и динамических нелинейных связанных задач электроупругости и термоэлектроупругости для дискретных и распределенных моделей упругих элементов электростатических преобразователей компонентов нано- и микросистемной техники;

2) разработаны общие алгоритмы применения современных численных методов продолжения по параметрам решений нелинейных операторных уравнений (алгебраических уравнений, обыкновенных дифференциальных уравнений, уравнений в частных производных) к задачам статики, устойчивости и динамики дискретных и распределенных механических систем;

3) исследована точность и применимость приближенных аналитических методов теории ветвления и асимптотических методов нелинейной механики к существенно нелинейным задачам, возникающим при моделировании нано- и микроэлектромеханических систем.

Достоверность проведенных исследований обеспечивается использованием в работе строгих методов математики и механики; сравнением результатов, полученных приближенными аналитическими методами, с точными решениями; сравнением решений, полученных численными методами, с аналитическими решениями.

Научная значимость работы состоит в выявлении и качественном исследовании на основе уточненных математических моделей принципиально важных для приборостроения свойств (структура возможных положений равновесия, допускаемые значения физических параметров системы и др.) и

характеристик (спектральных, резонансных и др.) упругих элементов различных современных и перспективных нано- и микроэлектромеханических систем.

Практическая значимость работы состоит в том, что предложенные автором методы, алгоритмы и математические модели могут быть эффективно использованы при проектировании и отработке технологии изготовления микромеханических акселерометров и гироскопов, микродатчиков давления, микронасосов, ультразвуковых преобразователей, высокочастотных переключателей, элементов оптических и телекоммуникационных систем (линзы, диафрагмы, оптические переключатели, микрозеркала и дифракционные решетки), систем автономного энергообеспечения, биомедицинских приборов (биосенсоры, детекторы массы прилипающей частицы, системы направленного транспорта лекарственных веществ в организме) и др. устройств, построенных на основе емкостных преобразователей. Результаты работы, также, позволяют оптимизировать процесс проектирования с целью сокращения времени на разработку и повышения качества за счет учета максимального количества физических эффектов.

Рекомендуется использовать предложенные в работе методы исследования нелинейной динамики и устойчивости распределенных механических систем в связанных полях при проектировании чувствительных элементов микромеханических приборов инерциальной навигации.

Оценка структуры и оформления работы. Работа объемом 145 страниц состоит из введения, трех глав, отдельно сформулированных выводов и списка литературы (118 источников).

Диссертация оформлена аккуратно, в единообразном стиле в соответствии с требованиями ГОСТ 7.0.11-2011.

К достоинствам работы следует отнести полученные в результате аналитического и численного исследования ветвления форм равновесия, свободных и вынужденных колебаний математические модели упругих

элементов микроэлектромеханических систем – нелинейных осцилляторов, элементов подвесов, мембран, пластин – в условиях совместного действия механического, электрического и температурных полей. Анализ математических моделей в виде нелинейных дифференциальных уравнений выполнен с применением нескольких методов с последующим сравнением их эффективности и достоверности. Для решения задач нелинейной динамики с учетом существенно нелинейных эффектов предложено использовать численные методы качественного анализа – методы продолжения по параметрам решений нелинейных операторных уравнений.

Вместе с тем, к работе имеются **следующие замечания:**

1. Разработанные математические модели упругих элементов микроэлектромеханических систем, полученные на основе аналитических и численных решений, не учитывают сложную геометрию реальных устройств и элементов конструкции, влияние на характеристики технологических разбросов на этапе изготовления и др.

2. Представляла бы большой практический интерес разработка общих символьных алгоритмов, реализующих автоматические процедуры подготовки нелинейных редуцированных моделей конструкций на основе их реальных инерционных, жесткостных и диссипативных характеристик.

3. В работе практически не рассматриваются вычислительные алгоритмы, основанные на прямом численном методе конечных элементов. Детальное сравнение аналитических результатов, полученных автором, с прямыми численными решениями рассматриваемых задач термоэлектроупругости позволило бы определить область применимости и точность как аналитических, так и численных алгоритмов, что имело бы большое значение для процессов инженерной разработки объектов нано- и микросистемной техники.

4. В работе отсутствуют результаты экспериментальных исследований.

Заключение.

Диссертационная работа Лукина Алексея Вячеславовича «Нелинейная динамика и устойчивость упругих элементов нано- и микросистемной техники в связанных полях», несмотря на имеющиеся замечания, является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержатся решения задач, имеющих значение для развития нано- и микросистемной техники. Диссертационная работа Лукина А.В. удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела».

Настоящий отзыв рассмотрен и одобрен на заседании научно-методической комиссии института (протокол № 3 от 26.02.2019 г.).

Председатель научно-методической
комиссии института, главный научный сотрудник,
д.т.н., профессор

Колесов Николай Викторович

Начальник научно-технического центра «Дизайн-центр»,
к.т.н.

Беляев Яков Валерьевич

Государственный научный центр Российской Федерации
АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»
Россия, г. Санкт-Петербург
197046, Россия, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30
8(812) 232-9970
office@eprib.ru
<http://www.elektropribor.spb.ru>