

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 539.3

ЧИГАРЕВ
Виталий Анатольевич

ДИНАМИКА ДЕФОРМИРУЕМЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
С ИЗМЕНЯЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ЗА СЧЁТ ОБРАТНОГО
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

Минск 2017

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель **Чижик Сергей Антонович**, доктор технических наук, профессор, академик НАН Беларуси, Первый заместитель председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси

Официальные оппоненты: **Журавков Михаил Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика» Белорусского государственного университета,

Можаровский Валентин Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительная математика и программирование» УО «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины»

Оппонирующая организация УО «Белорусский государственный университет транспорта»

Защита состоится 04.07.2017 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.07 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, город Минск, пр-т Независимости, 65, корпус 1, аудитория 202, телефон учёного совета 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 02 июня 2017 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций Д 02.05.07
кандидат физ.-мат. наук, доцент

П.И. Ширвель

©Чигарев В.А., 2017

©Белорусский национальный
технический университет, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Миниатюризация современного машиностроения требует новых подходов к проектированию и созданию миниатюрных машин (роботов), на основе синтеза механики, физики, информатики и кибернетики. Широко применяются эффекты электромагнитоупругости в твёрдых телах (пьезоэлектрические, магнитоэластические) и электрореологические и магнитоэластические. Большую роль в процессе миниатюризации играет получение новых композиционных и сверхчистых материалов типа пьезомагнитокерамик, пьезомагнитополимеров, метаматериалов, смартматериалов и т.д.

Миниатюрные машины принципиально имеют более простую систему передачи энергии от внутреннего источника к исполнительным органам вследствие чего коэффициент полезного действия у них выше, чем у макро машин, хотя законы механики, термодинамики те же, что для макро машин. Основой для расчётов являются разделы механики деформируемого твёрдого тела, использующие соответствующие модели механики сплошной среды. Создание микропроцессорной техники позволило реально внедрить в производство проекты миниатюрных машин различного назначения. Теория динамики твёрдых тел (шар, колесо, диск) достаточно давно разрабатывается в теоретической механике негोलонномных систем. Уравнения электродинамики сплошных сред совместно с уравнениями механики сплошной среды образуют связанные системы уравнений электромагнитоупругости, являющихся основой для расчётов прямого и обратного эффектов пьезоэлектричества, открытых братьями Кюри в 1880 году.

В работе разработаны механико-математические модели деформационного механизма поступательного движения платформ-актуаторов для роботов шаровой и цилиндрической форм за счёт обратного пьезоэлектрического эффекта деформирования и преобразования энергии поверхностных волн, возбуждаемых в пьезоэлектриках, в механические колебания внешней поверхности цилиндра, мембраны, конечностей-стержней типа обобщённой модели Тимошенко для пьезоэлектриков. Это позволило описать математически ряд моделей минироботов, созданных В.Т. Минченей.

Научная новизна работы состоит в разработке теоретических основ механики минироботов на основе пьезодвигателей с применением электроупругих материалов, что способствует дальнейшему прогрессу в создании микро- и нанороботов в отличие от других механизмов движения (механические, электромеханические), которые ограничены минимально допустимыми размерами объекта («проклятие» минимизация масштаба).

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг., утверждённых постановлением Совета министров Республики Беларусь № 585 от 19.04.2010 г. - пункт 7.1: «механика, надёжность, безопасность и экологичность машин, трение и износ в машинах, методы расчёта, моделирования, проектирования, конструирования и испытаний машин, агрегатов и узлов»; пункт 8.4: «новые композиционные материалы на основе металлов, керамики и углерода, нано- и микроструктурированные материалы и способы их синтеза, нанотехнологии, моделирование и создание адаптивных материалов»; пункт 12.1: «физические и математические методы и их применение для решения актуальных проблем естествознания, техники, новых технологий, экономики и социальных наук», а также приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2011-2015 гг., утверждённых Указом Президента Республики Беларусь № 378 от 22.07.2010 г. - пункт 13. Макротехнология «Микроэлектроника и субмикронные технологии твердотельной электроники»; пункт 27. Макротехнология «Медицинская техника и технологии»; пункт 33. Макротехнология «Медицинские биотехнологии»; пункт 36. Макротехнология «Производство новых материалов для промышленности и здравоохранения».

Диссертационные исследования соответствуют приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2016-2020 годы утверждённых советом министров Республики Беларусь 12 марта 2015 г. № 150 пункт 3 «Биологические системы и технологии»; пункт 7 «Системы и компоненты машин»; пункт 8 «Многофункциональные материалы и технологии», а также приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016-2020 годы, утверждённых Указом Президента Республики Беларусь № 166 от 22 апреля 2015 г. - пункт 3. «Промышленные и строительные технологии и производство: робототехника, интеллектуальные системы управления; новые многофункциональные материалы, специальные материалы с заданными свойствами»; пункт 4. «Медицина, фармацевтика, медицинская техника: медицинская техника»; пункт 6. «Био- и наноиндустрия: нанотехнологии».

Диссертационные исследования выполнялись в рамках темы:

Тема БРФФИ по ГБО9-16 № Г.Р. 20090716 «Разработать физические модели безшарнирных механизмов с пьезоэлектрическим приводом, в том числе с использованием материалов с эффектом памяти формы, и принципы управления ими в изменяющихся и неопределённых условиях внешней среды), руководитель В.Т. Минченя, БНТУ.

Цели и задачи исследования

Основной целью диссертационной работы является постановка и решение задач динамики деформируемых механических систем с изменяемой геометрией за счет обратного пьезоэлектрического эффекта со сферической, цилиндрической симметрией и стержней-пластин прямоугольной, треугольной, шестиугольной форм, опирающихся на жесткую плоскость с помощью конечностей-стержней,

приводимых в колебательное движение под действием электрических полей, применительно к созданию мобильных пьезоэлектрических платформ для миниатюрных роботов.

Для достижения сформулированной цели требовалось решить следующие задачи:

- определить напряжения и деформации в полой деформируемой сфере из пьезоэлектрика, стоящим на плоскости, постепенно теряющим устойчивость за счёт деформации корпуса и в дальнейшем его качении под действием силы тяжести и волны деформации, бегущей по внешней поверхности шара;

- получить модели поступательного перемещения в жидкости сферической оболочки (мембраны), заполненной жидкостью, вследствие деформации формы корпуса путём создания псевдоподий и вибрации корпуса под действием внутренних источников;

- решить задачи моделирования поступательных перемещений цилиндрической платформы для миниробота за счёт локализации и трансформации энергии гармонических поверхностных волн в колебательные движения структур типа гребней и стержней, скреплённых с корпусом;

- решить задачи возбуждения упругих колебаний в слоистой пластине биморфе с плоскостью параллельной или имеющей небольшой угол наклона с опорной плоскостью и опирающейся на плоскость с помощью упругих стержней, концы которых, движутся по траекториям, создающим эффект весла;

- решить задачу создания поступательного перемещения робота-трипода с платформой типа прямоугольной пластины из пьезоэлектрика, имеющей вертикальную ориентацию, с целью получения эффективного шагающего режима поступательного перемещения по твёрдым поверхностям;

- получение приближенных решений задач модального анализа на основе перехода к косоугольным координатам в пластине треугольной формы и обосновать возможность приближённого спектрального анализа треугольной, шестиугольной пластин с помощью круглой пластины для модели миниробота гексапода.

Научная новизна:

- впервые разработаны механико-математические модели платформ для миниатюрных мобильных роботов, поступательные и вращательные движения которых на твёрдой поверхности и в жидкой среде осуществляются пьезодвигателями, использующие обратный пьезоэлектрический эффект;

- решены задачи возбуждения механических деформаций, смещений элементов платформ для минироботов типа полого шара, эластичной сферы и цилиндра, полого цилиндра с волновыми гребенчатого типа, пластин-стержней с горизонтальной и вертикальной ориентацией;

- разработан подход приближённого модального анализа для пластин с геометрией правильных многоугольников, применяемых в качестве платформ миниатюрных мобильных роботов и для которых неизвестен вид собственных функций и спектр частот;

- применяются численно-аналитические методы разделения переменных, разложение по собственным функциям, переход к криволинейным и косоугольным

координатам в сочетании с компьютерными методами нахождения высших форм собственных колебаний и частот;

Полученные результаты применялись при создании макетов учебных мини-роботов для специальности «Компьютерная мехатроника» БНТУ.

Положения диссертации, выносимые на защиту

1. Механико-математические модели миниатюрных мобильных роботов, платформа которых имеет форму полого шара, полого цилиндра, пластин-стержней прямоугольной и треугольной форм с квазигоризонтальной и вертикальной ориентациями и изготовленных из пьезоупругоэлектрических материалов, обладающих обратным эффектом.

2. Расчёт напряжений, деформаций, перемещений, которые возникают в поверхностном слое полого шара из пьезоэлектрика под действием электрического поля и определение условия качения шара по плоскости под действием силы тяжести и деформационной анизотропии коэффициента трения качения.

3. Вычисление полей перемещений в поверхностной волне, возбуждаемой в полом цилиндра из пьезоэлектрика встречно-штыревым способом, энергия которых локализуется в гребенчатых структурах прямоугольной и треугольной форм и которые непосредственно контактируют с опорной поверхностью или через систему опорных стержней, концы которых перемещают робот в требуемом направлении вследствие эффекта весла.

4. Модели поступательного перемещения мягкого мини-робота в жидкой внешней среде, которое происходит за счёт создания внутренних течений в рабочей жидкости и изменения геометрии робота путём образования гиперэластичных псевдоподий, либо за счёт вибрационного перемещения поверхности модели под воздействием внутренних источников вибрации.

5. Модели мобильного робота на основе слоистой биморфной прямоугольной пластины квазигоризонтальной и вертикальной ориентаций, опирающейся на плоскость посредством стержней, поперечно-продольные вибрации концов, которых создают перемещение платформы.

6. Модальный анализ пластин непрямоугольных и некруглых форм из пьезоэлектрических материалов, собственные формы колебаний которых и резонансные частоты, определяются на основе использования соответствующей косоугольной системы координат в сочетании с возможностью использовать круговую аппроксимацию собственных форм колебаний для правильных многоугольников.

Личный вклад соискателя учёной степени

Все основные результаты, представленные в диссертации, получены автором лично. Научный руководитель Чижик С.А. принимал участие в постановке задач и анализе полученных результатов. Результаты численного исследования напряжений, деформаций, перемещений в пластинах и опорных стержнях были выполнены на основе макетов роботов, предложенных В.Т. Минченей. Сделаны самостоятельные выводы и предположения по решению рассмотренных в диссертации проблем.

Результаты, принадлежавшие другим соавторам совместных научных исследований, не вошли в данную диссертационную работу.

Апробация результатов диссертации и информация об использовании её результатов

Основные результаты диссертации докладывались на ряде научно-технических конференций в Беларуси, России, Англии: Научно-практическая конференция учёных МАДИ (ГТУ), РГАУ-МСХА, ЛНАУ, Москва-Луганск 2012, Россия; 6-ая международная научно-техническая конференция «Наука - образованию, производству, экономике», Минск 2008, Беларусь; EUROMECH Colloquium 481 «Recent advances in the theory an application of surface and edge waves», Keel University, 2007, England; 5-й Белорусский конгресс по теоретической и прикладной механике «Механика – 2011», Минск 2011, Беларусь; Международная научно-практическая конференция учёных МАДИ (ГТУ), РГАУ-МСХА, ЛНАУ, секция «Естественные и технические науки», Москва-Луганск, 2010, Россия; Международная научно-практическая конференция «Оптика неоднородных структур», Могилёв, 2007, Беларусь; 12-я Международная научно-техническая конференция «Наука – образованию, производству, экономике», Минск, БНТУ, 2014, Беларусь; Международная научная конференция «Теории оболочек и мембран в механике и биологии: от макро- до нано размерных структур = Shell and Membrane Theories in Mechanics and Biology: from Macro- to Nanoscale Structures», Минск, БГУ, 2013, Беларусь; Conference «Dynamical systems – Theory», Lodz, 2013, Poland; 14-я Международная научно-техническая конференция «Наука-образованию, производству, экономике» 69-ая научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ, Минск, БНТУ, 2016, Беларусь.

Опубликование результатов диссертации Основные результаты исследований опубликованы в 21 печатной работе, в том числе в: 10 статьях в научных изданиях, включенных в перечень, рекомендованных ВАК Республики Беларусь для результатов диссертационных исследований, общим объёмом 2,23 авторских листа, 8 статьях в сборниках материалов конференций, 3 тезисах докладов научных конференций.

Структура и объём диссертации Работа состоит из введения, общей характеристики работы, трёх глав, заключения, списка использованных источников (99 наименований) и списка работ автора (21 наименование). Объём работы составляет 125 страниц, включая 83 рисунка на 54 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, определяются основные проблемы и направления диссертации.

В первой главе выполнен краткий обзор исследований в области пьезоэлектростатической упругости, общих принципов получения уравнений пьезоэлектростатической упругости на основе законов механики, электродинамики и термодинамики сплошной среды. Наличие структурной асимметрии материала является одной из важнейших предпосылок того, что материал обладает упругими пьезоэлектрическими эффектами.

Для получения определяющих соотношений, уравнений баланса, граничных условий используются термодинамические потенциалы, выбор которых

определяется конкретикой решаемых задач и вариационные принципы механики, электродинамики, термодинамики.

Система уравнений линейной электроупругости имеет вид

$$T_{ij,j} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}; \quad (1)$$

$$T_{jk} = C_{jklm}^D S_{lm} - h_{ijk} D_i; \quad (2)$$

$$E_i = \beta_{ij}^S D_j - h_{ijk} S_{jk}, \quad (3)$$

где T_{ij} – тензор напряжений; u_i – перемещения; C_{jklm}^D – тензор модулей упругости при постоянной электрической индукции; β_{ij}^S – тензор обратный тензору; ε_{ij}^S – диэлектрической проницаемости; h_{ijk} – тензор пьезоэлектрических модулей.

Определяющие соотношения (2), (3) могут быть записаны в другом виде, если независимыми переменными являются электрическое поле E_i и механические напряжения T_{ij} :

$$S_{jk} = d_{ijk} E_i + S_{jklm}^E T_{lm}; \quad (4)$$

$$D_i = \varepsilon_{ij}^T E_j + d_{ijk} T_{jk}, \quad (5)$$

где S_{jklm}^E – тензор упругих податливостей; D_i – электрическая индукция; E_i – напряжённость электрического поля; d_{ijk} – тензор константы.

Система уравнений (1)–(3) или (1), (4), (5) образуют связанные системы уравнений электроупругости, которые дополняются уравнениями электродинамики

$$\nabla \times \bar{E} + \frac{1}{C} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = 0, \quad \nabla \cdot \bar{B} = 0; \quad (6)$$

$$\nabla \times H - \frac{1}{C} \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} = 0, \quad \nabla \cdot \bar{D} = 0. \quad (7)$$

На границе задаются краевые условия:
механические

$$T_{ij} n_j = P_i \quad \text{при} \quad x \in S_T; \quad (8)$$

$$u_i = u_i^S \quad \text{при} \quad x \in S_u, \quad (9)$$

где n_j – внешняя нормаль к поверхности $S = S_T + S_u$, ограничивающей объём V .

Электрические условия записываются в виде

$$\varphi = \varphi^S \quad \text{при} \quad x \in S_{\varphi}, \quad (10)$$

где φ – электрический потенциал, причём

$$E_i = \varphi_{,i}. \quad (11)$$

В случае негармонических воздействий формулируются также начальные условия.

Отметим, что учёт электропроводности в уравнениях электроупругости (1–11) аналогичен учёту теплопроводности в уравнениях термоупругости, с той разницей, что вместо уравнений теплопроводности используются уравнения электропроводности (электродинамики).

В третьем параграфе приводятся ограничения, которые накладываются на компоненты пьезоэлектрического тензора по отношению к операциям симметрии, что в соответствии с принципами П. Кюри позволяет указывать направления, в которых следует прикладывать механические напряжения, чтобы выявить в материале конструкции пьезоэлектрические свойства.

Четвёртый параграф посвящён вопросам применения поверхностных волн в электроупругих материалах, для совершения работы по перемещению платформы. Электрический потенциал (ток), гармонически изменяясь, возбуждает упругие волны деформации, которые переносят упругую энергию от источников к исполнительным органам (конечностям), взаимодействие которых с поверхностью (связью) создаёт механическое перемещение по ней.

Волновые аттракторы – места конструкции, которые являются локализаторами энергии, перемещения точек в них относительно других точек тела максимальны. Установлено, что целесообразно возбуждать в рассматриваемых конструкциях роботов поверхностные упругие волны, а актуаторы, непосредственно создающие перемещения, крепить к платформе в местах волновых аттракторов. Важное значение в локализации и концентрации энергии в нужном месте играют структура среды, конструктивные особенности. С помощью распределения неоднородности среды можно создать волноводы, локализирующие поток энергии в их границах за счёт топографии поверхности также канализировать и управлять линиями тока энергии поверхностных волн.

Уравнения распространения волн в однородной анизотропной упругой среде записываются в виде

$$C_{ijkl} u_{l,jk} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}. \quad (12)$$

Решение (12) в виде плоской упругой волны, бегущей в направлении x_1 и экспоненциально убывающей с глубиной по направлению x_2 ищется в виде

$$u_k = u_k^0 e^{-\chi x_2} \exp \left[i\omega \left(t - \frac{x_1}{v} \right) \right]. \quad (13)$$

Вектор \bar{n} имеет компоненты

$$n_1 = 1, \quad n_3 = 0, \quad \chi = \frac{i\omega}{v} n_2, \quad \text{Im} n_2 < 0, \quad \text{Re} \chi > 0. \quad (14)$$

Выражение (13) с учётом (14) записывается в виде

$$u_k = u_k^0 \exp \left[i\omega \left(t - \frac{n_l x_l}{v} \right) \right]. \quad (15)$$

Подставляя (15) в (12) получаем алгебраическую систему уравнений для u_k^0 , из условия равенства нулю определителя, которой получается уравнение Релея для поверхностной волны. В случае пьезоэлектрической среды система уравнений (12) записывается с учётом электрического поля, определяемого потенциалом $\varphi(x, t)$, который задаётся в виде плоской поверхностной волны

$$\varphi = \varphi_0 \exp \left[i\omega \left(t - \frac{n_l x_l}{v} \right) \right], \quad (16)$$

учитываемой в уравнении (12), где в левую часть добавляются члены e_{kij} , $\varphi_{,jk}$, и уравнение Пуассона, которое замыкает систему четырех уравнений

$$e_{jkl} u_{l,jk} - \varepsilon_{jk}^S \varphi_{,jk} = 0 \quad (17)$$

Получаемое в этом случае уравнение Релея относительно скорости V имеет восьмой порядок. Физически приемлемым является один корень, однако по сравнению с чисто упругой волной Релея здесь существует спектр поверхностных волн, в том числе волна Блюстейна-Гуляева, поляризованная перпендикулярно сагиттальной плоскости. Приращение для работы W , совершаемой внешними силами над деформируемым твёрдым телом объёма V , имеет вид

$$\delta W = \int_{V_0} d(E_C + \Phi) dV, \quad d\Phi = T_{ik} dS_{ik}. \quad (18)$$

Изменение энергии E , содержащейся в объёме V , записывается в виде

$$\frac{dE}{dt} - \int_S P_k l_k dS = 0, \quad (19)$$

где вектор Умова-Пойнтинга P_k имеет вид

$$P_k = -T_{ik} \frac{\partial u_i}{\partial t}. \quad (20)$$

Вектор $\vec{P} = (P_1, P_2, P_3)$ указывает направление распространения энергии, его длина равна количеству энергии, переносимому через единицу поверхности S , перпендикулярной к направлению распространения энергии за единицу времени (плоскость потока мощности). Вектор скорости переноса энергии V^e направлен по касательной к линии тока энергии, а, следовательно, параллелен \vec{P} . Тогда

$$\vec{V}^e = \vec{P} E^{-1}. \quad (21)$$

Для плоской волны проекция \vec{V}^e на вектор \vec{n} (направление луча) даёт фазовую скорость

$$V_{\phi} = \bar{v}^e \cdot \bar{n}. \quad (22)$$

К достоинствам использования пьезодвигателей на поверхностных волнах Релея относится эффективность возбуждения их с помощью встречно-штыревых преобразователей (рисунок 1).

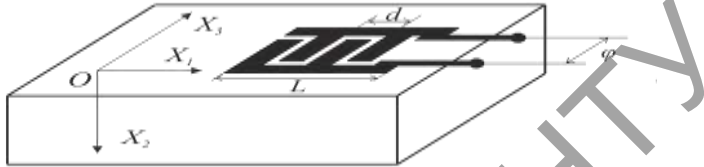


Рисунок 1. – Схема топографии электродирования поверхности

Поверхностная волна Релея не обладает дисперсией, легко и точно управляется с помощью волноводов. Вследствие того, что длина волны Релея в 10^5 раз больше длин электромагнитных волн для одной и той же частоты, это позволяет миниатюризировать роботы с пьезоэлектрическими двигателями.

В пятом параграфе рассмотрены актуаторы в виде стержней, скреплённых с платформой робота, совершающих продольно-поперечные колебания, таким образом, что их свободные концы, контактирующие с неудерживающей связью (свободной поверхностью) совершают движения по траекториям и обеспечивают эффект весла. Рассмотрены сферические платформы для мини роботов с внутренним и внешним типами приводов на колесе-шаре (рисунок 2).

Вращение шара обусловлено передачей импульсов продольно-поперечно осциллирующим стержнем, контактирующим свободным концом со сферой под определённым углом, а второй конец связан с пьезоэлектрическим элементом 3, возбуждающим в нём колебания. Вращение сферы (цилиндра) в нужном направлении обеспечивается режимом колебания.



1 – внешнее вращение сферы; 2 – вращение сферы внутренним образом

Рисунок 2. – Схема пьезоэлектрических актуаторов

Эффективность пьезодвигателей зависит от многих факторов, одним из которых является возбуждение колебаний стержня в резонансном режиме. Коэффициент полезного действия пьезодвигателя достигает 85% и существенно зависит от его прочности, механической и электрической добротности. В связи с тем, что уравнения электроупругости подобны уравнениям

термоупругости для их решения применимы методы, основанные на переходе к криволинейным и косоугольным координатам, в которых краевые задачи имеют

наиболее простой вид, допускается разделение переменных, искомые решения ищутся в виде разложений по собственным функциям, модальный анализ проводится аналитическими и численными методами.

Вторая глава посвящена решению задач электроупругости и динамики для платформ минироботов, имеющих форму шара и цилиндра из пьезоэлектрика.

В первом параграфе рассмотрена модель качения деформируемого шара из пьезоэлектрика по плоскости под действием силы тяжести. Внешняя поверхность шара покрыта электродами в виде тонких пластинок, имеющих форму сферических треугольников и трапеций. Шар расположен на плоскости, деформируясь под действием собственного веса, область контакта представляет собой круг, в центр которого проектируется центр масс шара. Статическое равновесие шара устойчивое пока проекция центра масс не окажется на границе области контакта. Вследствие деформации под действием обратного пьезоэлектрического эффекта создаётся анизотропия коэффициента трения качения в области контакта, что инициирует качение шара в требуемом направлении (рисунок 3 а, 3 б).



Рисунок 3. – Схема этапов деформирования внешней поверхности шара, потери устойчивости и начала качения

Напряжения и деформации находятся из решения граничной задачи для уравнения

$$\frac{dT_{rr}}{dr} + \frac{1}{r}(2T_{rr} - T_{\theta\theta} - T_{\varphi\varphi}) - \rho \frac{\partial^2 u_r}{dt^2} = 0, \quad (23)$$

где $T_{rr}, T_{\theta\theta}, T_{\varphi\varphi}$ – напряжения радиальные и окружные соответственно, u_r – радиальное перемещение, ρ – плотность.

В приближении квазистатики D_r удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial D_r}{\partial r} + \frac{2}{r} D_r = 0, \quad (24)$$

где D_r – радиальная составляющая электрической индукции.

Для случая полярной поляризации определяющие уравнения записывается в виде

$$\begin{aligned}
T_{rr} &= C_{13}^E S_{\theta\theta} + C_{13}^E S_{\varphi\varphi} + C_{13}^E S_{rr} - \varepsilon_{33} E_r; \\
T_{\theta\theta} &= C_{11}^E S_{\theta\theta} + C_{12}^E S_{\varphi\varphi} + C_{13}^E S_{rr} - \varepsilon_{31} E_r; \\
T_{\varphi\varphi} &= C_{12}^E S_{\theta\theta} + C_{11}^E S_{\varphi\varphi} + C_{13}^E S_{rr} - \varepsilon_{31} E_r,
\end{aligned} \tag{25}$$

где $E_r = -d\varphi/dr$ – радиальная компонента вектора напряжённости электрического поля; φ – потенциал; S_{ij} – тензор деформаций; T_{ij} – тензор напряжений.

С учётом определяющих соотношений (25) для напряжений и для электрической индукции

$$D_r = \varepsilon_{31}(S_{\theta\theta} + S_{rr}) + \varepsilon_{33} S_{rr} + \varepsilon_{33} E_r, \tag{26}$$

и формул Коши.

$$S_{rr} = \frac{du_r}{dr}; \quad S_{\theta\theta} = \frac{u_r}{r}; \quad S_{\varphi\varphi} = \frac{u_r}{r}, \tag{27}$$

связанные уравнения для u_r и φ записываются в виде

$$C_{33}^E \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left[r^2 \frac{du_r}{dr} \right] + 2 \left(C_{13}^E - C_{12}^E - C_{11}^E \right) \frac{u_r}{r} - \rho \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} = \varepsilon_{33} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\varphi}{dr} \right) + 2\varepsilon_{31} \frac{d\varphi}{dr}; \tag{28}$$

$$\varepsilon_{33} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\varphi}{dr} \right) = \varepsilon_{33} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{du_r}{dr} \right) + 2\varepsilon_{31} \frac{d}{dr} (ru_r). \tag{29}$$

Интегрируя (28), (29) при заданных граничных условиях, получаем выражения для u_r и φ . Для получения эффекта качения локальное смещение u_r задаётся в виде бегущей волны вдоль меридиана в направлении качения, рисунок 3 (б).

Во втором параграфе рассматривается модель платформы в форме цилиндра. Математическая постановка задачи формулируется в цилиндрической системе координат. Пьезоэлектрик поляризован по толщине, возбуждается поверхностная волна, бегущая в окружном направлении. Выражения для перемещения u_3 и потенциала φ записываются в виде бегущих волн

$$u_3 = U_r(r) e^{i(p\theta - \omega t)}; \quad U_r(r) = AI p \left(\frac{\omega}{V_0} r \right); \tag{30}$$

$$\varphi = \Phi(r) e^{i(p\theta - \omega t)}; \quad \Phi(r) = Br p + \frac{\varepsilon_{15}}{\varepsilon_{11}} AI p \left(\frac{\omega}{V_0} r \right). \tag{31}$$

Произвольные константы A и B находятся из граничных условий, а из условия существования ненулевых A и B получаем дисперсионное уравнение для нахождения собственных (резонансных) частот, имеющего достаточно сложный вид

$$k_1^2 p = \left(\frac{\omega R}{V_0} \right) \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_c} \right) \frac{Q^-}{Q^+} \right]; \quad Q^\mp = 1 \mp \left(\frac{R_i}{R_e} \right)^{2p}. \tag{32}$$

На рисунке 4 показана зависимость $\omega R/V_0$ от волнового параметра p .

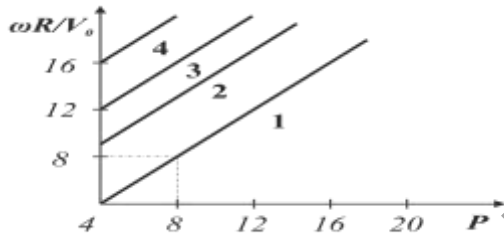
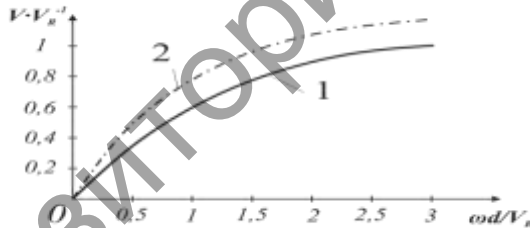


Рисунок 4. – Зависимость безразмерной частоты от волнового параметра p

В третьем параграфе рассматривается задача возбуждения колебаний в актуаторах-конечностях с помощью поверхностных волн. В работе рассматриваются две модели мобильных платформ для конструирования мини роботов.

Зависимость влияния толщины гребня на скорость колебаний края гребня изображено на рисунке 5.



1 – кривая для гребня толщины d ; 2 – кривая для тонкой полу-бесконечной пластины; V – скорость краевой волны; V_R – скорость волны Релея; d – толщина гребня; ω – частота

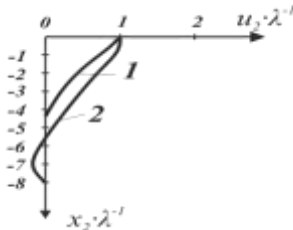
Рисунок 5. – Зависимость скорости распространения колебаний по краю гребня от толщины гребня

На рисунке 6 представлена асимптотическая ($R \rightarrow \infty$) зависимость амплитуды пьезоэлектрической поверхностной волны от глубины в зависимости от частоты резонанса.

В четвертом параграфе рассмотрены две модели плоского поступательного перемещения круглой эластичной мембраны, заполненной жидкостью в жидкой среде при создании двух режимов перемещения точек мембраны.

При первом режиме, часть псевдоподий удлинится, заполняется внутренней жидкостью и за счёт смещения центра масс перемещается в заданном направлении.

Второй режим создается за счёт возбуждения колебаний мембраны электродами. Вибрирующая во внешней жидкой среде мембрана создаёт поступательное движение центра масс. Комбинация двух режимов движения также приводит шар-мембрану в поступательное движение.



1 – кривая для дорезонансной частоты; 2 – кривая послерезонансной частоты

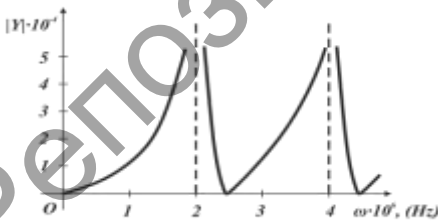
Рисунок 6. – Зависимость амплитуды поверхностной волны от глубины при $R \rightarrow \infty$

перемещений в стержнях, являющихся обобщениями балок Релея и Эйлера-Бернулли на случай пьезоэлектриков.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x_1^4} - (1 + \mu) \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^2 \partial \tau^2} + \mu \frac{\partial^4 w}{\partial \tau^4} + \frac{12}{\delta^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} + \mu \eta \delta \left(\frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_1^4} - \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_1^2 \partial \tau^2} \right) + \frac{1}{\delta} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} = 0; \tag{33}$$

$$\delta k_{31}^2 \frac{\partial^2 w}{\partial w_1^2} + \delta \left(k_S^2 \beta_0 - k_{31}^2 \mu_0 \right) \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} + \frac{\beta_0}{12} \left(1 - k_S^2 \right) \delta^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} - \Phi = 0,$$

где w - поперечный изгиб, Φ - потенциал.



$\omega_r^{(i)}$ – частота резонанса;
 ω_a – частота антирезонанса

Рисунок 7. – Зависимость адмитанса

$Y = Z^{-1}$ от частоты ω

Третья глава посвящена расчётам вибраций стержней и пластин из электроупругих материалов, которые могут использоваться в качестве элементов конструкций мобильных минироботов. В первом параграфе третьей главы рассматривается обобщение балки Тимошенко на случай пьезоэлектрических материалов. Применяется метод разделения переменных и метод характеристического уравнения для нахождения резонансных и антирезонансных частот и

На рисунке 7 представлена зависимость адмитанса от частоты, на которой выделены резонансные и антирезонансные частоты.

Во втором параграфе третьей главы рассматривается двухслойная пластина из пьезоэлектрического материала, поляризованная по толщине и электродированная по внешним поверхностям и срединной плоскости.

Система уравнений имеет вид

$$\begin{aligned} C_{66}^E \nabla^2 u + \left(C_{11}^E - C_{66}^E - C_{33}^E \Omega \right) \frac{\partial \theta}{\partial x_1} + \rho \omega^2 u &= 0; \\ C_{66}^E \nabla^2 v + \left(C_{11}^E - C_{66}^E - C_{33}^E \Omega \right) \frac{\partial \theta}{\partial x_2} + \rho \omega^2 v &= 0. \end{aligned} \quad (34)$$

Рассматривается платформа для минибота, представляющая собой пластину-биморф, плоскость которой имеет вертикальную ориентацию, электродированную по боковым и срединной плоскостям, что создаёт упругие поперечные колебания, вследствие чего конечности, прикреплённые к свободным плоскостям совершают колебания и при взаимодействии с плоскостью создают шаговый режим движения. Эксперименты, проведённые В.Т. Минченей на реальной модели, (рисунок 8 а) показывают, что подобная конфигурация обладает высокой энергоэффективностью в том числе при перемещении по вертикальным поверхностям.

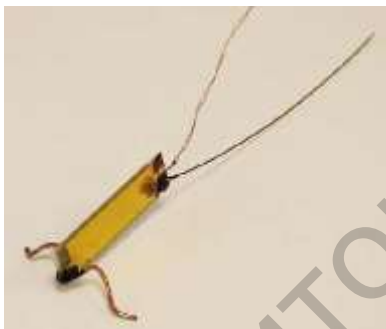


Рисунок 8 (а). – Модель робота пластины-биморфа, разработанная В.Т. Минченей

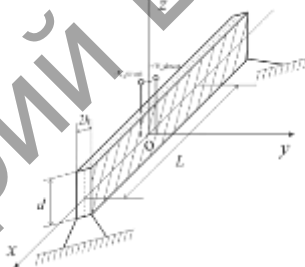
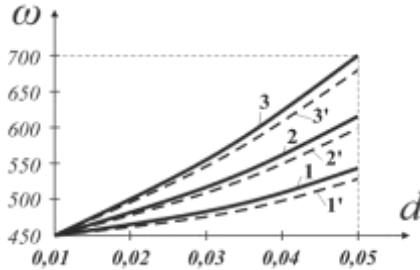


Рисунок 8 (б). – Трёхмерная модель робота пластины-биморфа в аксонометрическом виде

Полные перемещения u_i имеют вид

$$\begin{aligned} u_1 = u + \frac{x_3^2}{2} \frac{C_{13}^E}{C_{33}^E (1 - k_3^2)} \frac{\partial \theta}{\partial x_1}; \quad u_2 = v + \frac{x_3^2}{2} \frac{C_{13}^E}{C_{33}^E (1 - k_3^2)} \frac{\partial \theta}{\partial x_2}; \\ u_3 = - \frac{x_3}{(1 - k_3^2)} \left(\frac{C_{13}^E}{C_{33}^E} \theta + \frac{V_0}{h} \frac{l_{33}}{C_{33}^E} \right). \end{aligned} \quad (35)$$



1 – при значении длины $l = 0,005$, м; 2 – при значении длины $l = 0,01$, м; 3 – при значении длины $l = 0,015$, м; сплошные линии – пьезоэлектрик; пунктирные линии – значения для упругого стержня Тимошенко С.П.

Рисунок 9. – Зависимость собственной частоты ω от ширины d

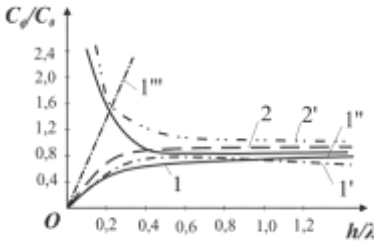
Потенциал φ линейно изменяется по толщине стержня

$$\varphi = \frac{V_0}{h} x_3. \quad (36)$$

Собственные частоты колебаний, описываемые системой (35), зависят от длины и диаметра стержней. На рисунке 9 изображена зависимость собственной частоты от ширины стержня при заданных значениях длины.

На рисунке 10 изображены зависимости $\frac{C_\varphi}{C_0}$ от h/λ , рассчитанные по точным уравнениям теории упругости и приближенным моделям стержней.

В четвертом параграфе третьей главы рассматриваются приближенные методы аналитического и численного анализа конструктивных элементов, платформ имеющих непрямоугольную форму. Рассмотрена задача о трипode, представляющем собой пластину из пьезоэлектрика, имеющей форму правильного треугольника, углы которого изгибаются под 90° , служат опорными конечностями, вибрация которых обеспечивает перемещение минибота по плоскости. Для приближенного описания колебаний пластины треугольной формы применяется переход к косоугольной системе координат.



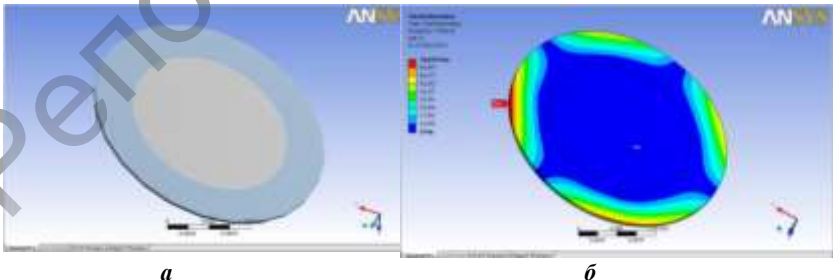
1, 2 – кривые для точных решений, 1' и 2' – кривые для решений по теории Тимошенко, 1'' – кривые для решений по теории Релея, – кривая для решения по теории Бернулли-Эйлера

Рисунок 10. – Зависимость групповой скорости C_{ϕ}/C_0 от h/λ

Второй подход к анализу пластин, представляющих правильные многоугольники, основывается на замене правильной многоугольной пластины круглой, для которой известны собственные функции и спектр резонансных частот. Это позволяет оценить не только нижнюю частоту, но и найти частоты более высоких мод.

На рисунке 11 видно, что существуют частоты и радиусы пластинок, для которых невозможно возбудить колебания на этих частотах.

На основе конечноэлементного анализа был смоделирован круглый пьезоэлемент вне сборки (рисунок 12 а), что позволило определить форму колебий при заданной частоте, а также максимальные продольные и поперечные колебания пластины.



а – графическое окно с отображением пьезоэлемента круглой формы с напылением пьезокерамики; б – цветовая схема напряжённо-деформированного состояния пластины.

Рисунок 12. – Модель пьезоэлектрической пластины круглой формы

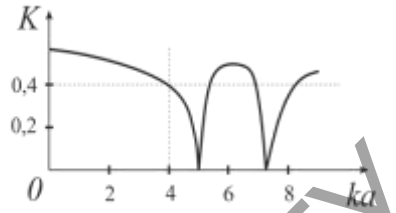


Рисунок 11. – Зависимость коэффициента электромеханической связи от соотношения между радиусом пластины и длиной волны $\lambda = k^{-1}$

На рисунке 12 (б) представлено напряжённо-деформированное состояние пластины при резонансных колебаниях для моды 5 (частота – 17506 Гц, амплитуда – 78,078 мкм).



Рисунок 13. – Диаграмма и таблица собственных частот двигательной системы миниробота при моде номер 10

форм и частот колебаний показывает хорошее совпадение с экспериментальными данными как для низких, так и для высоких частот, что позволяет с высокой степенью надёжности применять программные средства «CADFEM» для нахождения резонансных частот для платформ минироботов различных форм.

Использование программных средств «CAD FEM» позволило провести анализ функциональных возможностей систем в условиях управляемого резонанса и выделить наиболее приемлемые решения в тех или иных случаях использования минироботов. Анализ результатов численных расчётов по определению собственных

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

В результате выполнения работы получены следующие новые результаты, которые рекомендуется использовать для моделирования и расчёта динамики платформ миниатюрных роботов.

1. Разработаны новые модели элементов мобильных миниатюрных роботов из пьезоэлектрических материалов, что позволяет на основе использования обратного пьезоэлектрического эффекта создавать преобразователи электрической энергии в упругую для совершения работы по перемещению платформы мобильного миниробота по поверхности [3, 5, 6, 9, 13, 16, 17, 18, 20, 21].

2. Установлено, что полый шар из пьезоэлектрика, используемый для монтажа сенсоров, актуаторов, контроллера миниробота и катящийся по плоскости за счёт его деформации в области контакта под действием силы тяжести, имеет преимущества по минимизации размеров в 2-3 раза по сравнению с шаровыми роботами, катящимися вследствие смещения центра масс с помощью механических устройств или гиросtatического эффекта [4, 7, 8].

3. Созданы конструктивные схемы применения поверхностных упругих волн, возбуждаемых в пьезоэлектрической подложке с помощью электродов встречно-штыревого типа и в волноводах типа гребней, что позволяет локализовать в них упругую энергию колебаний, которая преобразуется в работу по перемещению по поверхности платформы в виде горизонтального цилиндра [3, 4, 11, 14, 15, 20, 21].

4. Изучены два режима перемещения эластичной мембраны, заполненной жидкостью, имеющей псевдоподию в виде гофрированных трубок цилиндрической формы, на дне которых имеются эластичные электродные пластинки, что

позволяет поступательно перемещаться с помощью последовательного образования псевдоподий или (и) вибрации мембраны [1, 5, 6, 10, 12, 19].

5. Механико-математические модели конструктивных элементов мобильных мини-роботов типа пластин и стержней из пьезоэлектриков прямоугольной и косоугольной форм, для приближенного нахождения собственных форм колебаний, для чего применяются методы косоугольных координат и приближенного анализа собственных форм и частот колебаний, позволяющих найти аппроксимацию собственных форм и частот колебаний [2, 3, 7, 9, 12, 20, 21].

6. Созданы модели платформ, имеющих двухслойную структуру, электродированную по свободным и срединной плоскостям и которые при помощи стержневых конечностей перемещаются по плоскости за счёт возбуждаемой в них вибрации. Пластины применяются для создания платформ мини-роботов с горизонтальной и вертикальной ориентацией [9, 14, 17, 18].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Методы численно-аналитического анализа конструктивных элементов типа шар, цилиндр, пластина, стержень из пьезоэлектрических материалов могут быть использованы при проектировании, производстве и эксплуатации миниатюрных мобильных роботов различного назначения. Использование пьезоэлектрических материалов позволяет создавать минимашинны с коэффициентом полезного действия около 85%, избежать ограничения масштаба чисто механической миниатюризации снизу, что открывает возможности проектировать и создавать также микро- и нано-роботы из пьезоэлектриков, автономно перемещающиеся в различных средах.

Применение твёрдых, жидких, газообразных материалов с электромагнитореологическими свойствами позволяет проектировать и создавать мягкие мини-роботы, близкие по своим характеристикам к мини и микро биологическим объектам, что особенно важно в медицине. Способность мобильных мини и микро-роботов перемещаться по разнородным поверхностям, реагировать на неоднородность поверхности, получать, обрабатывать и передавать информацию открывает обширную область применения мини-роботов, например, для оценки качества обработки внутренней поверхности труб, диагностики повреждённости, износа.

В дальнейшем расширение области применения мобильных мини-роботов на пьезоэлектрической основе будет идти ускоренными темпами в тех областях, где это уже имеет место: оборона, чрезвычайные ситуации, космос, энергетика, машиностроение, приборостроение.

Результаты исследований рекомендуется использовать в преподавании курсов: мобильные роботы, миниманипуляторы, строительная механика мини-роботов и робототехнических систем, мехатроника миниатюрных систем.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ**Статьи в рецензируемых журналах**

1. Чигарев, В.А. Влияние случайной неоднородности материала на устойчивость пластины при малых деформациях / В.А. Чигарев, Ю.В. Чигарев // Теоретическая и прикладная механика. – 2010. – Выпуск 25. – С. 107–114.
2. Расчет на прочность конструкционных изделий с использованием элементов теории вероятностей / Ю. В. Василевич, Е. Ю. Неумержицкая, А. М. Язневич, В. А. Чигарев // Теоретическая и прикладная механика – 2011. – Выпуск 26. – С. 91–96.
3. Циммерман, К. Модели поступательного движения мягкого микроробота амёбоподобного типа в жидкости / К. Циммерман, В.А. Чигарев // Теоретическая и прикладная механика. – 2012. – С. 142–148.
4. Миронов, Д. Н. Исследование совместного воздействия тепловых и силовых нагрузок, приложенных на внешней и внутренней границах / Д. Н. Миронов, В. А. Чигарев, В. П. Гончаренко // Теоретическая и прикладная механика. – 2013. – Выпуск 28. С. 100–103.
5. Чижик, С.А. Поступательное движение мягкого робота амёбоподобного типа / С. А. Чижик, К. Циммерманн, В.А. Чигарев // Теоретическая и прикладная механика. – 2014. – Выпуск 29. – С. 19–22.
6. Чигарев, Ю. В. К стохастической неустойчивости нелинейных колебаний стержней / Ю. В. Чигарев, В. А. Чигарев // Теоретическая и прикладная механика. – 2014. – Выпуск 29. – С. 69–72.
7. Миронов, Д.Н. Решение стационарной задачи термоупругости и термопластичности в приближении эффективной модели для тела цилиндрической формы / Д. Н. Миронов, В. А. Чигарев, В. П. Гончаренко // Теоретическая и прикладная механика. 2014. – Выпуск 29. – С. 200–203.
8. Решение стационарной задачи термоупругости и термопластичности в приближении эффективной модели для тела сферической формы / Д. Н. Миронов, В. П. Гончаренко, Ю. А. Чигарева, В. А. Чигарев // Теоретическая и прикладная механика. – 2016. – Выпуск 31. – С. 185–195.
9. Чигарев, В. А. Конечно-элементный анализ плоских и осесимметричных упругоплоскостных контактирующих поверхностей / В. А. Чигарев, И. И. Конон, М. О. Теляк // Теоретическая и прикладная механика. – 2016. – Выпуск 31. – С. 363–369.
10. Расчет и проектирование микрогирископов RR-типа / И. И. Конон, В. А. Чигарев, А. В. Муровейко, А. В. Хват // Теоретическая и прикладная механика. – 2016. – Выпуск 31. – С. 370–373.

Статьи в сборниках трудов и материалах научных конференций

11. Чигарев, А.В. Нелинейная динамика лучей в неоднородных средах и возможность возникновения детерминированного хаоса / А.В. Чигарев, В.А. Чигарев // Оптика неоднородных структур: Международная научно-практическая конференция. – Могилёв, 2007. – С. 23–24.
12. Chigarev, A.V. Wave propagation on surface of elastic inhomogeneous half-space / A.V. Chigarev, V.A. Chigarev // Abstracts of EUROMECH Colloquium 481

«Recent advances in the theory an application of surface and edge waves».– Keel University, 20–22 July 2007. – pp. 5–7.

13. Чигарев, В.А. Развитие промышленных роботов и методов их программирования / В.А. Чигарев, Ю.А. Чигарева // *Машиностроение: респ. межвед. сбор. науч. трудов: в 2 т. ; редкол.: Б.М. Хрусталеv. – Минск, 2009. – Т. 2. – Выпуск 24. – С. 123–125.*

14. Чигарев, В.А. Влияние случайной неоднородности материала на устойчивость пластины при малых деформациях / В.А. Чигарев, Ю.В. Чигарев // *Материалы междунар. науч.-практ. конф. учёных МАДИ (ГТУ), РГАУ-МСХА, ЛНАУ в 6 т., 17–18 июня 2010 г. / МАДИ, МСХА, ЛНА ; редкол.: Е.Г. Лисовская, А.В. Пошатаев, Л.Г. Дегтярева. – Москва-Луганск, 2010. – Т. 6. – С. 64–73.*

15. Чигарев, В.А. Упругопластическое деформирование цилиндрических и сферических тел под действием температурных полей / В.А. Чигарев, Ю.А. Чигарева // *Механика – 2011: V Бел. конгр. по теор. и прикл. мех., Минск, 26–28 окт. 2011 г. : в 2 т. / Объединённый институт машиностроения ; редкол.: М.С. Высоцкий, В.Б. Алыгин [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 2. – С. 411–415.*

16. Чигарев, В.А. Компьютерное моделирование динамики микроботов с ультразвуковым приводом в режиме управляемого резонанса / В.А. Чигарев, В.Т. Минченя, А.В. Чигарев // *Механика – 2011: V Бел. конгр. по теор. и прикл. мех., Минск, 26–28 окт. 2011 г. : в 2 т. / Объединённый институт машиностроения ; редкол.: М.С. Высоцкий, В.Б. Алыгин [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 2. – С. 416–422.*

17. Чигарев, В.А. Конечно-элементное моделирование динамики микроботов с пьезоэлектрическими приводами / В.А. Чигарев, В.Т. Минченя // *Материалы междунар. науч.-практ. конф. учёных МАДИ (ГТУ), РГАУ-МСХА, ЛНАУ: в 6 т., 19–20 янв. 2012 г. / МАДИ, МСХА, ЛНА ; редкол.: Е.Г. Лисовская, А.В. Пошатаев. – Москва-Луганск, 2012. – Т. 6. – С. 80–89.*

18. Borisov, A. Nonlinear dynamics of a framed structure in case of biped gait: chaotization and self-organization / A. Borisov, V. Chigarev, V. Krysko // *Dynamical systems – Theory, Lodz, 2–5 dec. 2013. / editors: J. Awrejcewicz, M. Kazmierczak, P. Olejnik, J. Mrozowski. – Lodz, 2013. – P. 99–108.*

Тезисы докладов научных конференций

19. Чигарев, В.А. Методы программирования промышленных роботов / В.А. Чигарев, Ю.А. Чигарева // *Наука – образованию, производству, экономике: материалы Шестой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2008 г. : в 3 т. / Бел. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б.М. Хрусталеv, Ф.А. Романюк, А.С. Калиниченко. – Минск, 2008. – Т. 2. – С. 302.*

20. Чигарев В.А. Моделирование динамики вибрационных микроботов, монтируемых на платформах-пластинах / В.Т. Минченя, С.А. Чижик, К. Циммерман, В.А. Чигарев // *Теории оболочек и мембран в механике и биологии: от макро- до наноразмерных структур = Shell and Membrane Theories in Mechanics and Biology: from Macro- to Nanoscale Structures: материалы междунар. науч. конф., Минск, 16–20 сент. 2013 г. / Бел. нац. техн. ун-т ; редкол.: Г.И. Михасев, Х. Альтенбах. – Минск, 2013. – С. 197–198.*

21. Zimmermann, K. Movement modelling of soft microrobot of amoebalike type in the heterogeneous environment / K. Zimmermann, V.T. Minchenia, S.A. Chizik,

V.A. Chigarev // Теории оболочек и мембран в механике и биологии: от макро- до наноразмерных структур = Shell and Membrane Theories in Mechanics and Biology: from Macro- to Nanoscale Structures: материалы междунар. науч. конф., Минск, 16–20 сент. 2013 г. / Бел. нац. техн. ун-т ; редкол.: Г.И. Михасев, Х. Альтенбах. – Минск, 2013. – С. 142–144.

РЕПОЗИТОРИЙ БНТУ

РЭЗІОМЭ
ЧЫГАРАЎ ВІТАЛЬ АНАТОЛЕВІЧ

**ДЫНАМІКА ДЭФАРМАВАННЫХ МЕХАНІЧНЫХ СІСТЭМ
З ЗМЯНЯНАЙ ГЕАМЕТРЫЯЙ ЗА КОШТ ЗВАРОТНАГА
П'ЕЗАЭЛЕКТРЫЧНАГА ЭФЕКТУ**

Ключавыя словы: электрапруткасць, п'езаэлектрычныя матэрыялы, мабільныя мініяцюрныя робаты, напружана-дэфармаваны стан пласцін, уласныя частоты пласцін і стрыжняў, рэзананс платформы.

Мэтай даследаванняў з'яўляецца пабудова механіка-матэматычных мадэляў электрап'езапрутковіх элементаў цвёрдых тэл, дэфармуецца пад дзеяннем электрычнага поля, якія ажыццяўляюць перамяшчэння па цвёрдай паверхні і ў вадкай асяроддзі ў якасці платформаў мініяцюрных мабільных робатаў у форме шара, цыліндру, абалонкі, пласціны-стрыжня.

У працы выкарыстаны матэматычны апарат раўнанняў у частковых вытворных для пабудовы механіка-матэматычных мадэляў пругкіх п'езаэлектрычных канструктыўных элементаў мініяцюрных мабільных робатаў, на аснове якога распрацаваны алгарытмы аналітычных і лікавых разлікаў НДС, уласных формаў ваганняў, рэзанансных частот для тэл ў форме шара, цыліндру, абалонкі, пласціны-стрыжня, а таксама набліжанага мадальнага аналізу пласцін ў форме правільных шматкутнікаў (трохкутнік, шасцікутнік).

Навуковая навізна заключаецца ў пабудове мадэляў канструктыўных элементаў робатаў з п'езаэлектрычных матэрыялаў тыпу шара, цыліндру, пласціны, стрыжня, мембраны, перамяшчэння якіх адбываюцца па паверхнях (сувязях) і ў вадкай асяроддзі пад дзеяннем электрычных палёў, якія выклікаюць пругкія дэфармацыі цела. Разліку рэзанансных, антырэзанансных частот і ўласных формаў ваганняў для пласцін, стрыжняў ў залежнасці ад фізіка-механічных, геаметрычных характарыстык задачы і накладзеных сувязяў. Вызначэнні высілкаў, дэфармацый, перасоўванняў ў шары з п'езаэлектрычнага матэрыялу, электрадзіраванага па вызначанай схеме, што абумоўлівае пры дасягненні напружана-дэфармаванага гранічнага стану пераход шара ў галіне кантакту ў стан качэння. Распрацоўцы падыходу набліжанага рашэння задач мадальнага і спектральнага аналізу пласцін з п'езаэлектрычнага матэрыялу, форма якіх уяўляе сабой правільны шматкутнік.

Вынікі даследаванняў: рэкамінавана выкарыстоўваць ва ўстановах адукацыі Рэспублікі Беларусь для стварэння навучальных макетаў мініяцюрных мабільных робатаў, навучальных курсаў па механіцы, мехатроніцы, а таксама ў іншых ведамствах пры праектаванні і стварэнні мабільных мініробатаў рознага прызначэння.

РЕЗЮМЕ
ЧИГАРЕВ ВИТАЛИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**ДИНАМИКА ДЕФОРМИРУЕМЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
С ИЗМЕНЯЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ЗА СЧЁТ ОБРАТНОГО
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА**

Ключевые слова: электроупругость, пьезоэлектрические материалы, мобильные миниатюрные роботы, напряженно-деформированное состояние пластин, собственные частоты пластин и стержней, резонанс платформы.

Целью исследований является построение механико-математических моделей электропьезоупругих элементов твёрдых тел, деформирующихся под действием электрического поля, совершающих перемещения по твёрдой поверхности и в жидкой среде в качестве платформ миниатюрных мобильных роботов в форме шара, цилиндра, оболочки, пластины-стержня.

В работе использован математический аппарат уравнений в частных производных для построения механико-математических моделей упругих пьезоэлектрических конструктивных элементов миниатюрных мобильных роботов, на основе которого разработаны алгоритмы аналитических и численных расчётов НДС, собственных форм колебаний, резонансных частот для тел в форме шара, цилиндра, оболочки, пластины-стержня, а также приближённого модального анализа пластин в форме правильных многоугольников (треугольник, шестиугольник).

Научная новизна заключается в построении моделей конструктивных элементов роботов из пьезоэлектрических материалов типа шара, цилиндра, пластины, стержня, мембраны, перемещения которых происходят по поверхностям (связям) и в жидкой среде под действием электрических полей, вызывающих упругие деформации тела. Расчёте резонансных, антирезонансных частот и собственных форм колебаний для пластин, стержней в зависимости от физико-механических, геометрических характеристик задачи и наложенных связей. Определении напряжений, деформаций, перемещений в шаре из пьезоэлектрического материала, электродированного по определённой схеме, что обуславливает при достижении напряженно-деформированного предельного состояния переход шара в области контакта в состояние качения. Разработке подхода приближённого решения задач модельного и спектрального анализа пластин из пьезоэлектрического материала, форма которых представляет собой правильный многоугольник.

Результаты исследований: рекомендовано использовать в учреждениях образования Республики Беларусь для создания учебных макетов миниатюрных мобильных роботов, учебных курсах по механике, мехатронике, а также в других ведомствах при проектировании и создании мобильных минироботов различного назначения.

SUMMARY
CHIGAREV VITALY ANATOLYEVICH

**DYNAMICS OF DEFORMABLE MECHANICAL SYSTEMS WITH
VARIABLE GEOMETRY DUE INVERSE PIEZOELECTRIC EFFECT**

Keywords: electroelasticity, piezoelectric materials, miniature mobile robots stress-strain state of the plate, the natural frequencies of plates and rods, platform resonance.

The purpose of research is to build mechanical and mathematical models electropiezoelastic elements solids, deformable under the influence of an electric field, is movable on a solid surface and in liquid media as platforms miniature mobile robots in the form of sphere, cylinder shell-rod plate.

We used a mathematical apparatus of partial differential equations for constructing mechanical and mathematical models elastic piezoelectric structural elements miniaturized mobile robots, on the basis of which the algorithms of analytical and numerical calculations stress-strain state natural modes, the resonance frequencies for objects in the form of a sphere, a cylinder, a shell, plate-rod and the approximate model analysis in wafer form regular polygons (triangle, hexagon).

Scientific novelty consists in the construction of models of the robots structural elements of piezoelectric materials such as ball, cylinder, plate, rod, membrane, movement of which take place along the surfaces (contacts) and in the liquid medium under the action of electric fields, causing elastic deformation of the body. Calculating the resonant antiresonant frequencies and natural modes for plates, rods, depending on the physico-mechanical and geometric characteristics of the problem imposed bonds. Determining stresses, strains, displacements in the bowl of a piezoelectric material on a particular elektroding scheme that determines when the stress-strain limit state transition ball in the contact region in a state of rolling. Developing an approach approximate solution model and the spectral analysis of the plates of piezoelectric material, whose shape is a regular polygon.

The results of studies is recommended to use in the Republic of Belarus educational institutions to create educational layouts miniature mobile robots, courses in mechanics, mechatronics, as well as other agencies in the design and creation of mobile minirobots for various purposes.

Репозиторий БНТУ

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Усл.печ.л. 1,40. Уч.-изд.л. 1,09.
Тираж 74 экз. Заказ 475.