

На правах рукописи

Николаева Анна Сергеевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ
АКТИУАТОРОВ ДИСКРЕТНОГО ДЕЙСТВИЯ**

01.02.06 - Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва - 2015

Работа выполнена в Московском Государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гаврюшин Сергей Сергеевич

Официальные оппоненты: **Лопаницын Евгений Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика», Московский государственный
Машиностроительный университет (МАМИ)

Хроматов Василий Ефимович, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Динамика и прочность машин», Московский энергетический институт (МЭИ)

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова

Защита диссертации состоится 24 февраля 2016 г. в 16.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.03 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.
Телефон для справок: +7(499)263-66-39

Автореферат разослан « » декабря 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Карпачев А.Ю.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Актюаторы дискретного действия активно используются в современных технических устройствах: в качестве предохранителей, переключателей и термореле для защиты от перегрузки электроизделий промышленного назначения и бытовой техники, в микро-электро-механических системах (МЭМС) и микро-опто-электро-механических системах (МОЭМС).

Известные аналитические методики для анализа тонкостенных оболочечных конструкций не позволяют в полной мере и с требуемой точностью учесть все особенности процесса нелинейного деформирования современных биметаллических актюаторов, а также аналогичных исполнительных элементов, изготовленных из неметаллических материалов. Оказывается недостаточным исследовать процесс деформирования только в докритической области или рассматривать задачу в линейной постановке. Процесс деформирования исполнительных элементов и биметаллических актюаторов новых конструкций является существенно нелинейным, зависящим от многих параметров, поэтому решение, как правило, оказывается многозначным и чувствительным к малым возмущениям. Процесс расчета и проектирования подобных элементов требует создания уточненных методик с использованием подходов многокритериальной оптимизации. Необходимо совершить переход от решения задач анализа к решению задач синтеза рациональных конструкций.

Использование для численного решения данного класса прикладных задач современных конечно-элементных комплексов (ANSYS, Abaqus и т.п.) связано со значительным временем счета на ЭВМ и, по сути, является не совсем пригодным для решения задач синтеза. В ряде случаев использовании МКЭ трудозатратно и нерационально, поскольку требует многократного перестроения сетки при варьировании геометрических параметров конструкции.

Таким образом, актуальность работы определяется необходимостью решения важной прикладной научно-технической задачи, посвященной расчету и проектированию актюаторов дискретного действия, применяемых в конструкциях электротехнических устройств, улучшением их качества и потребительских свойств.

Цель и задачи работы: разработка методики расчета и проектирования сложного многопараметрического процесса нелинейного деформирования актюаторов дискретного действия.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. Критический анализ и обобщение существующих подходов с целью выбора рациональных расчетных моделей актюаторов дискретного действия.
2. Разработка алгоритма нелинейного анализа и синтеза конструкций исполнительных элементов на основе выбранных расчетных моделей.
3. Создание численной методики на основе возможностей существующих прикладных программных комплексов и авторских программ для реализации алгоритма расчета исполнительных элементов.
4. Проверка достоверности и тестирование результатов работы программы, их сопоставление с результатами, полученными с помощью программного комплекса «ANSYS», результатами решения тестовых задач и результатами эксперимента.
5. Реализация разработанной методики для решения практических задач создания новых и улучшения существующих конструкций актюаторов дискретного действия.

Методы исследования. Для анализа процесса нелинейного деформирования актюаторов использовались классические модели нелинейной теории тонкостенных конструкций. Задача сводилась к краевой задаче для системы нелинейных дифференциальных уравнений и системе нелинейных алгебраических уравнений высокого порядка, зависящих от нескольких параметров. Для анализа осесимметричных актюаторов дискретного действия применялся метод продолжения по параметру (Валишвили Н.В.), для синтеза осесимметричных актюаторов применялся метод смены подпространства управляющих параметров в сочетании с многопараметрическим подходом (Гаврюшин С.С.). Проектирование актюаторов сложной формы осуществлялось с помощью метода конечных элементов (Зенкевич О., Бате К.Ю., Новожилов В.В.) и эволюционного алгоритма (Сторн Р., Прайс К.). Данные методы реализованы в авторских программах «Актюатор 1.0», «Актюатор 2.0», ANSYS, Abaqus, Matlab, pSeven.

Научная новизна. Диссертация является законченной оригинальной научно-исследовательской работой, содержащей решение прикладной технической задачи, имеющей важное народно-хозяйственное значение. На защиту выносятся следующие положения диссертации, обладающие элементами научной новизны:

1. Создана численная методика синтеза актюаторов дискретного действия, позволяющая совершенствовать существующие и создавать новые конструкции мехатронных устройств;

2. Предложен алгоритм, реализующий плавный переход между подпространствами параметров при движении по поверхности равновесных состояний;
3. Разработан комплексный подход, позволяющий определять рациональные параметры актюаторов для реализации дискретного срабатывания с использованием авторских программ и существующих прикладных программных комплексов;
4. Получены результаты, проясняющие влияние различных параметров на процесс нелинейного деформирования актюаторов дискретного действия;
5. Созданы новые конструкции актюаторов дискретного действия, защищенные патентом, использование которых позволит существенно повысить эксплуатационные свойства устройств.

Достоверность результатов Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций работы обоснована:

1. Строгим использованием классических механических концепций и адекватного математического аппарата;
2. Проверкой разработанного алгоритма и программы расчета на модельных и тестовых задачах;
3. Соответствием полученных численных результатов с данными экспериментов, с аналитическими, численными и экспериментальными данными, полученными другими авторами;
4. Опытом практического внедрения достигнутых результатов в ООО «Сенсорные системы МГТУ им. Н.Э. Баумана»

Практическая ценность работы. Разработаны методика, алгоритм и программное обеспечение для расчета и проектирования актюаторов дискретного действия, используемых в современных электротехнических устройствах. Выданы рекомендации по рациональному проектированию актюаторов сложной геометрической формы. Разработаны новые конструкции мехатронных устройств. Полученный патент может быть использован для расширения элементной базы МЭМС.

Реализация работы. Результаты диссертационной работы и разработанное программное обеспечение внедрены в практику проектирования микроэлектромеханических устройств на ООО «Сенсорные системы МГТУ им. Н.Э. Баумана».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и были одобрены на XXI Международном Симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (г. Кремёнки, 2015 г.), на IV Международной конференции «Композиты и новые материалы» (г. Рэксем, Великобритания, 2015 г.), на Объединенной конференции исследователей университетов Глиндор и Стаффордшир (г. Сток-он-трент, Великобритания, 2015 г.), на конференции «Современные материалы для

ресурсоемких приложений» (г. Ст. Асаф, Великобритания, 2014), на XIX Международном Симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (г. Ярополец, 2013), на V Международной конференции «Проблемы механики современных машин» (г. Улан-Удэ, 2012).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе в 4 рецензируемых журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 154 листах машинописного текста, включая 96 рисунков и 15 таблиц. Библиография работы содержит 162 наименования.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель исследования, научная новизна и практическая ценность работы, приведено краткое содержание работы по главам.

В первой главе приводится обзор и анализ литературных источников, посвященных истории создания и современному состоянию термобиметаллических элементов, применению актюаторов дискретного действия в конструкциях современных устройств и особенностям расчета и проектирования актюаторов с дискретной расчетной характеристикой.

Актюаторы в виде тонких биметаллических элементов активно используются в современных технических устройствах в качестве предохранителей, переключателей, термореле для защиты от перегрузки электроизделий, в МЭМС, МОЭМ и др. Наибольшее распространение получили биметаллические актюаторы в форме ламели, пластинки, диска с отверстием в центре или без него (Рис. 1).

Основы теории расчета термобиметаллических элементов заложены в трудах У. Вилларсо, С.П. Тимошенко, Д.Ю.Панова, В.И. Феодосьева, Э. И. Григолюка. Исследованием нелинейного поведения тонкостенных механических конструкций занимались С.Д. Пономарев, Л.Е. Андреева, Н.В. Валишвили, С.С. Гаврюшин и др.; за рубежом – Reissner E., Crisfield M.A., W.H. Wittrick, B.D. Aggarwala, E. Saibel и др.

Задача анализа биметаллического актюатора дискретного действия заключается в определении его упругой характеристики, т.е. зависимости между перемещением характерной точки и изменением температуры T , при известных конструктивных параметрах (Рис. 1). Особенностью данной характеристики является скачкообразное изменение формы элемента при достижении критической температуры T_1^{kp} (точка В). Новая рабочая точка

Известные аналитические методики для анализа традиционных конструкций биметаллических актюаторов не позволяют в полной мере и с требуемой точностью учесть все особенности процесса нелинейного деформирования биметаллических актюаторов современных конструкций. Процесс деформирования биметаллических актюаторов новых конструкций является существенно нелинейным и многопараметрическим, поэтому решение часто оказывается многозначным и чувствительным к малым возмущениям, во многих случаях требуется уточненный расчет. Методики, позволяющие решать задачи анализа и синтеза (выбор рациональных параметров актюатора для реализации заданной упругой характеристики) актюаторов сложной формы, в доступной автору литературе отсутствуют.

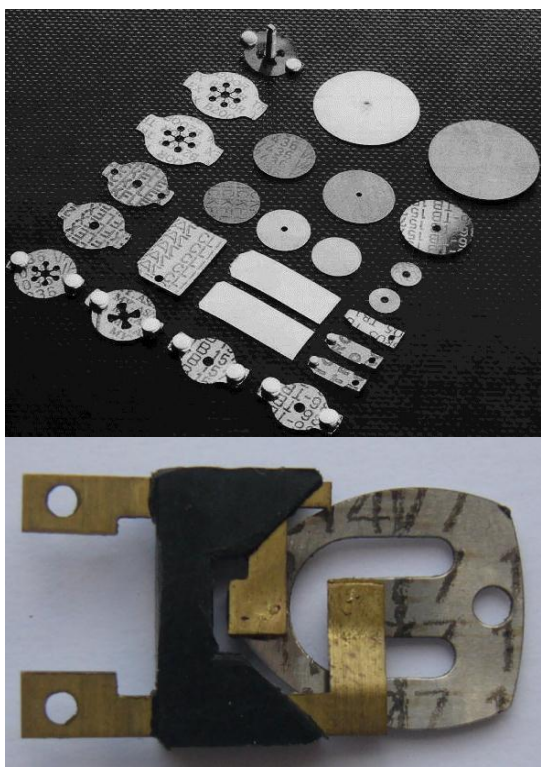


Рис. 2. Упругая характеристика
актюатора дискретного действия

Использование конечно-элементных комплексов (ANSYS, Abaqus) для анализа данного класса прикладных задач требует больших трудозатрат и значительного времени счета на ЭВМ. При использовании МКЭ невозможно в качестве параметра продолжения выбирать параметр геометрии, т.к. при каждом шаге по этому параметру потребуется перестроение сетки и решение задачи заново. Актуальным для

практических нужд становится решение задачи многокритериальной оптимизации.

Предлагаемые алгоритмы позволяют осуществить переход от задачи анализа к задаче синтеза актюаторов дискретного действия с заданной упругой характеристикой.

Во второй главе приводятся основные соотношения, используемые для анализа нелинейного поведения актюаторов дискретного действия. Выбор расчетной модели, основных соотношений и численного метода определялся размерностью задачи. Для анализа процесса нелинейного деформирования осесимметричных биметаллических актюаторов использовалась одномерная расчетная схема осесимметричной двухслойной оболочки и уравнения нелинейной механики деформируемого твердого тела для тонких упругих оболочек. Для анализа процесса нелинейного деформирования биметаллических актюаторов сложной формы применялся метод конечных элементов с использованием расчетной схемы двумерной двухслойной оболочки.

Анализ нелинейного деформирования осесимметричных актюаторов сводится к решению одномерной многопараметрической нелинейной краевой задачи путем ее сведения к системе нелинейных операторных уравнений и задаче Коши. В качестве исходных соотношений используется модифицированный вариант теории тонких осесимметричных оболочек, использующий гипотезы Кирхгофа-Лява.

При описании геометрии актюатора отсчетная поверхность совмещается со слоем спая. Вдоль ее меридиана от центральной точки отсчитывается координата S_0 (Рис.3). Для описания физико-механических свойств материала используется линейно-упругого модель: материал оболочки следует закону Гука (E_1, E_2 - модули упругости верхнего и нижнего слоев соответственно, α_1, α_2 - коэффициенты линейного теплового расширения верхнего и нижнего слоев соответственно, коэффициенты Пуассона $\mu_1 = \mu_2 = \mu$). Толщины слоев (h_1 и h_2) являются известными

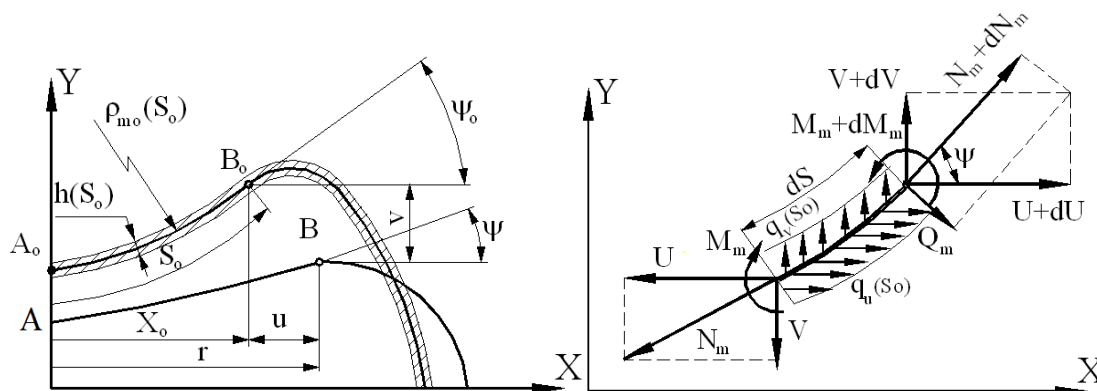


Рис.3. К выводу дифференциальных соотношений, описывающих нелинейную деформацию осесимметричных ТБ куполов

функциями дуговой координаты S_0 и подчиняются известному соотношению Виларсо.

Геометрические соотношения рассматриваемого варианта уравнений осесимметричных оболочек записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned}\frac{dv}{dS_0} &= (1 + \varepsilon_{mo}) \sin \psi - \sin \psi_0, \\ \frac{du}{dS_0} &= (1 + \varepsilon_{mo}) \cos \psi - \cos \psi_0, \\ \frac{d\psi}{dS_0} &= (1 + \varepsilon_{mo}) \kappa_{mo} + \frac{d\psi_0}{dS_0}.\end{aligned}\tag{1}$$

Здесь ψ_0 и ψ - начальный и текущий угол наклона касательной к меридиану; u и v - горизонтальная и вертикальная компоненты перемещений в текущей точке; ε_{mo} , ε_{to} , κ_{mo} и κ_{to} - деформации и изменения главных кривизн элемента поверхности спая. Уравнения равновесия для деформированного состояния имеют вид:

$$\begin{aligned}\frac{dU}{dS_0} &= -(1 + \varepsilon_{mo}) \left(\frac{\cos \psi}{X_0 + u} U - \frac{N_t}{X_0 + u} + P_u \right), \\ \frac{dV}{dS_0} &= -(1 + \varepsilon_{mo}) \left(\frac{\cos \psi}{X_0 + u} V + P_v \right), \\ \frac{dM_m}{dS_0} &= -(1 + \varepsilon_{mo}) \left(\frac{\cos \psi}{X_0 + u} (M_m - M_t) - U \sin \psi + V \cos \psi \right).\end{aligned}\tag{2}$$

Здесь P_u и P_v - интенсивности распределенной нагрузки. X_0 - радиальная координата текущей точки. Величины, относящиеся к недеформированному состоянию, обозначаются нижним индексом «0». Для обозначения величин, соответствующих меридиональному направлению используется нижний индекс «m», а окружному - «t».

Неизвестные, производные которых входят в уравнения (1,2), рассматриваются как *основные* неизвестные, неизвестные, не входящие в этих соотношениях под знак дифференциала, рассматриваются как *вспомогательные*, поскольку они могут быть выражены через основные неизвестные с помощью следующих алгебраических соотношений:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{mo} &= \frac{1-\mu^2}{E_1 h_1 + E_2 h_2} (U \cos \psi + V \sin \psi) - \mu \frac{u}{X_0} + \frac{T(1+\mu)}{E_1 h_1 + E_2 h_2} (E_1 h_1 \alpha_1 + E_2 h_2 \alpha_2), \\
\kappa_{mo} &= \frac{3(1-\mu^2)}{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3} M_m - \mu \frac{X_0 + u}{X_0} \left(\frac{\sin \psi}{X_0 + u} - \frac{\sin \psi_0}{X_0} \right) + \frac{3T(1-\mu)}{2(E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3)} (E_1 h_1^2 \alpha_1 + E_2 h_2^2 \alpha_2), \\
N_t &= \frac{E_1 h_1 + E_2 h_2}{1-\mu^2} + \left(\frac{u}{X_0} + \mu \varepsilon_{mo} \right) - \frac{T}{1-\mu} (E_1 h_1 \alpha_1 + E_2 h_2 \alpha_2), \\
M_t &= \frac{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3}{3(1-\mu^2)} \left[\frac{X_0 + u}{X_0} \left(\frac{\sin \psi}{X_0 + u} - \frac{\sin \psi_0}{X_0} \right) + \mu \kappa_{mo} \right] - \frac{T}{2(1+\mu)} (E_1 h_1^2 \alpha_1 + E_2 h_2^2 \alpha_2)
\end{aligned} \tag{3}$$

Вектор состояния в текущем сечении оболочки имеет вид:

$$X^T = [v, u, \psi, V, U, M_m] \tag{4}$$

Анализ процесса нелинейного деформирования сводится к решению нелинейной краевой задачи для системы нелинейных дифференциальных уравнений (1-2), зависящей более чем одного внешнего параметра:

$$\frac{d\bar{X}}{ds_0} = \bar{F}(s_0, \bar{X}, \bar{Q}), \quad G_0(\bar{X}, \bar{Q}) = 0, \quad G_1(\bar{X}, \bar{Q}) = 0. \tag{5}$$

где Q - векторный параметр, характеризующий воздействующие на систему внешние возмущения, G_0, G_1 - матрицы граничных условий.

Кратко излагаются основные соотношения метода конечных элементов для задач нелинейного деформирования двухслойной оболочки, описываются конечные элементы, пригодные для описания больших перемещений.

В третьей главе излагается методика численного анализа и синтеза нелинейных процессов деформирования актюаторов дискретного действия. Описана авторская программа для решения задач анализа и синтеза осесимметричных актюаторов: приводятся блок-схемы, примеры входных данных и информация о получаемых результатах.

В рамках многопараметрического подхода, предложенного Гаврюшиным С.С., многопараметрическая задача рассматривается как последовательность кусочно-гладких однопараметрических нелинейных задач, принадлежащих многопараметрическому семейству, в которое погружена анализируемая задача. Основным инструментом для решения однопараметрических задач является метод продолжения по параметру: изменяется только один из внешних параметров, остальные внешние параметры в пределах кусочно-гладкого участка фиксируются по своим последним значениям на предыдущем однопараметрическом участке. Метод дискретного продолжения по параметру реализован по двухэтапной схеме предиктор-корректор (предсказание решения по решениям на предыдущих шагах и уточнение предсказанного решения итерационным

методом).

Движение по гиперповерхности равновесных состояний осуществляется с помощью метода смены подпространства управляющих параметров, позволяющего осуществлять движение по параметру геометрии и избежать трудностей с применением метода дуговых засечек (arc-length method), чувствительного к начальным условиям. Разворот при смене подпространства осуществлялся по плавной траектории (на каждом шаге приращение получали несколько параметров), что позволило устранить вычислительные трудности при решении задачи синтеза.

Идея иллюстрируется на примере проектирования двухслойного актюатора, выполненного из композиции кремния и оксида кремния, для реализации переключения при заданном значении температуры $T^* = 60^\circ\text{C}$. Кривая AC соответствует процессу нагрева купола с начальным значением радиуса кривизны, прощелкивающего при температуре, заведомо большей, чем T^* (Рис. 4). Кривая BD получена с применением процедуры плавной смены подпространства управляющих параметров. На этом участке произведен переход из подпространства $R = \text{const}$ в подпространство $T = \text{const} = T^*$. Кривая DE соответствует равновесным состояниям семейства куполов с плавно изменяющимся радиусом кривизны R . Процедура решения продолжалась вплоть до достижения особой точки E, соответствующей предельной точке для зависимости перемещение – радиус кривизны. Радиус кривизны $R^* = 32,4$ мм в этой точке, соответствует искомому значению, обеспечивающему прощелкивание актюатора при требуемой температуре T^* . Для проверки задача была решена повторно по пути нагружения AFE. Результаты с достаточной точностью совпали с решением по пути ABDE.

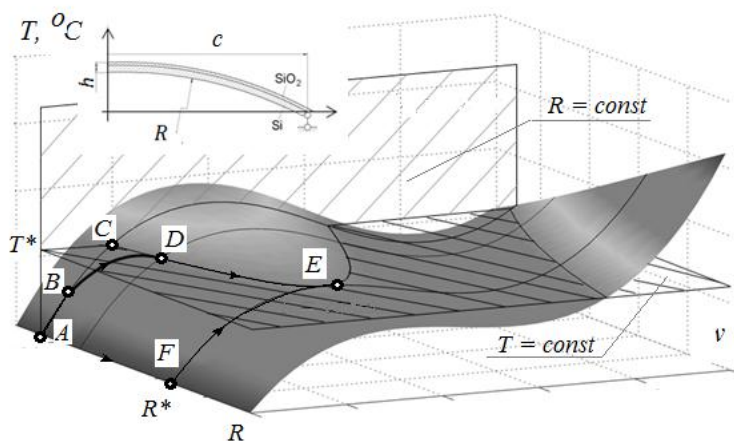


Рис. 4. Поверхность равновесных состояний ТБ купола в осях температура–радиус кривизны–прогиб

В третьей главе также приведено описание эволюционного алгоритма и метода суррогатного моделирования, примененных для решения задачи многопараметрического синтеза актюаторов сложной формы и

реализованных в программе Matlab. Значения критериев для каждого набора параметров вычисляется после решения задачи в программном комплексе ANSYS 14.5. Приведены основные опции, используемые при моделировании нелинейного поведения тонких оболочечных элементов.

Описан алгоритм решения задачи многокритериальной оптимизации в программных комплексах pSeven и ANSYS 14.5.

В четвертой главе приводится проверка достоверности результатов расчета, полученных с помощью разработанного алгоритма и его программной реализации. Результаты проверяются по известным решениям тестовых задач, экспериментальным результатам и посредством расчетов в конечно-элементном программном комплексе ANSYS 14.5. В данной главе также рассматривается влияние различных параметров актюаторов и гофрированных мембран на их рабочие характеристики. Приведены результаты решения задачи многопараметрической оптимизации для куполообразного актюатора и гофрированной мембраны и результаты решения задачи многокритериальной оптимизации.

На Рис.5 показана полученная упругая характеристика актюатора, закрепленного в центре. Рассматривается перемещение узла 1, соответствующего месту крепления контакта. Верхняя критическая температура $T_1^{кр} = 95^\circ\text{C}$, нижняя критическая температура $T_2^{кр} = 72^\circ\text{C}$. Результаты показывают хорошее совпадение, различие в критических температурах составляет менее 5%, что позволяет утверждать о достоверности полученных результатов. При измельчении сетки наблюдалась сходимость решения. При использовании различных конечных элементов получены схожие результаты. Результаты расчета показывают хорошее совпадение с результатами эксперимента (расхождение в критических температурах не превышает 8%).

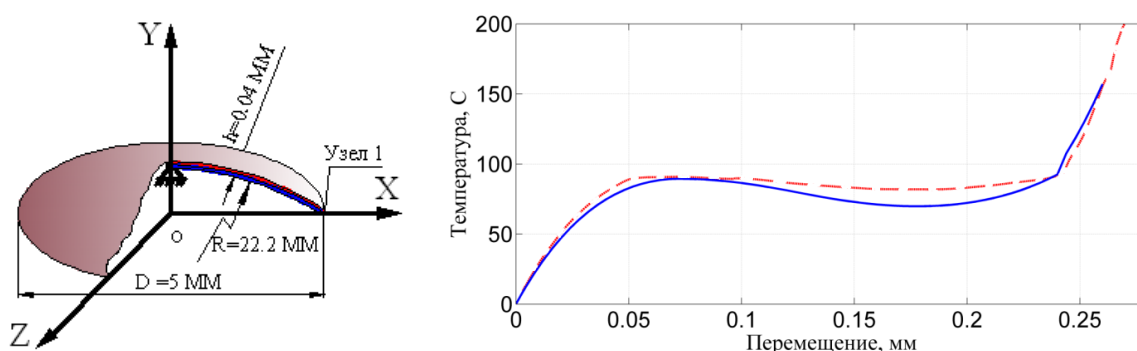


Рис.5. Рабочая характеристика актюатора (пунктирная линия – ANSYS 14.5, сплошная линия – авторская программа)

Приводятся результаты численного исследования влияния характерных геометрических характеристик актюаторов и гофрированных мембран на упругую характеристику (Рис.6).

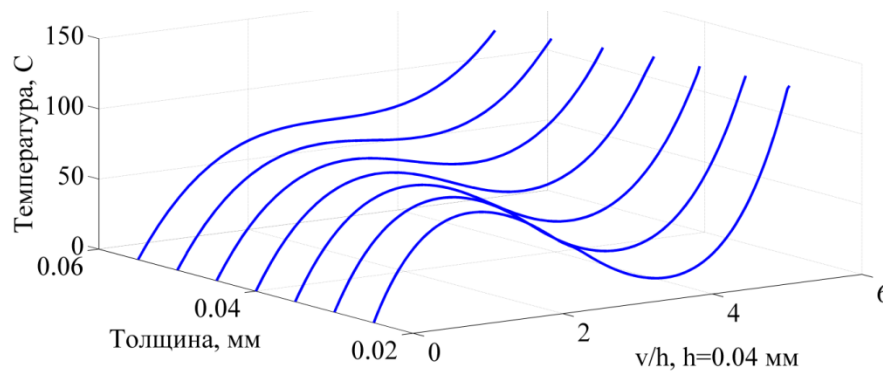


Рис. 6. Влияние толщины актюатора на рабочую характеристику (радиус кривизны - 30 мм, радиус опорной поверхности - 2.5 мм)

Решена задача минимизации площади актюатора, реализующего прохлопывание на заданную величину при заданном значении критического давления (были заданы ограничения на величину перемещения характерной точки после прохлопывания и критическое давление: $v^* \in [140, 150]$ мкм, $P^* \in [85, 95]$ Па). Геометрические параметры показаны на Рис. 7. В результате решения задачи оптимизации получены рациональные значения параметров.

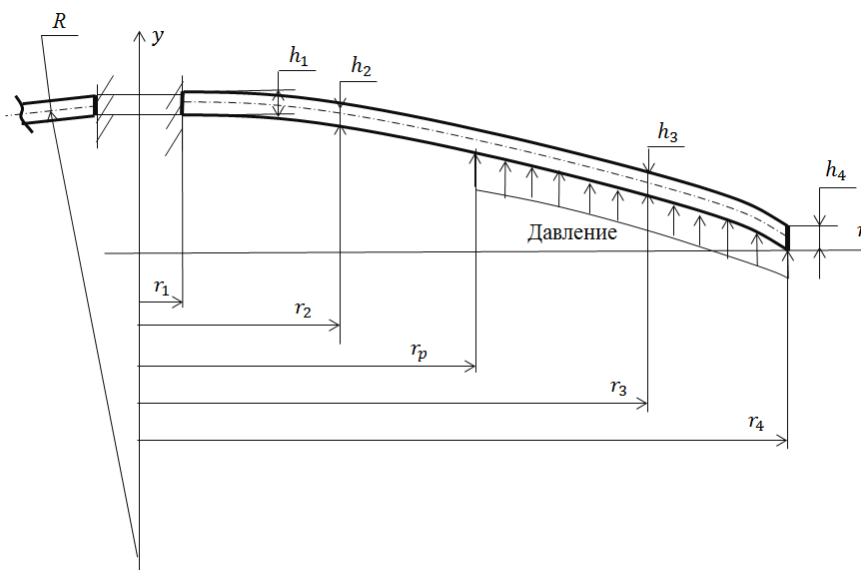


Рис. 7. Параметры актюатора для решения задачи оптимизации

С помощью метода смены подпространства управляющих параметров для гофрированной мембраны получено изолированное решение (решение, которое нельзя получить при непрерывном нагружении от нулевой точки). Для этого произведена смена параметра продолжения на параметр глубины гофрировки: движения по поверхности равновесных состояний

осуществлялось при неизменном значении давления (пунктирная линия на Рис. 8).

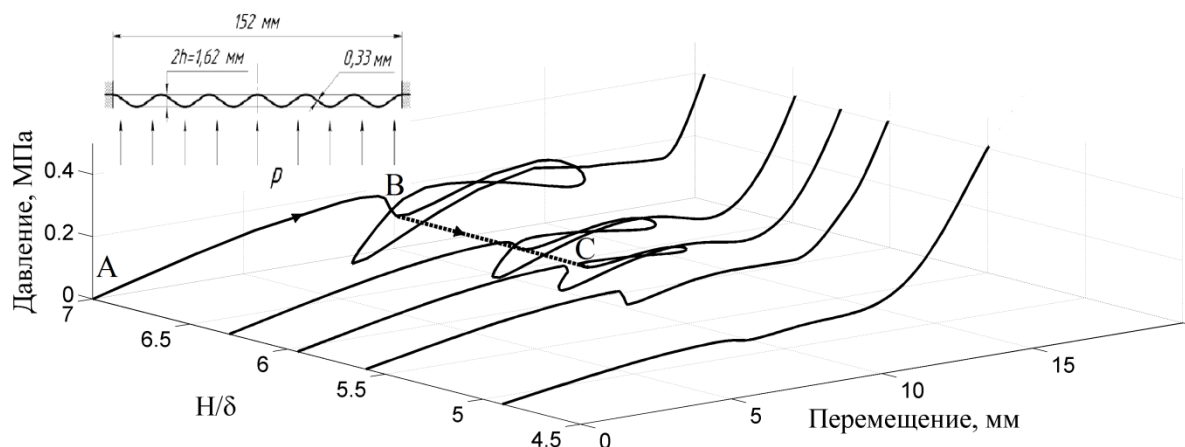


Рис. 8. Получение изолированного решения

Физический смысл изолированного решения, на наличие которого указал Феодосьев В.И., – это прохлопывание внешнего гофра, в случае, если гофрированная мембрана помещена в парафиновую пробку, не допускающую деформирования остальных гофров.

В пятой главе проводится расчет реальных и перспективных актюаторов дискретного действия сложной геометрической формы по разработанной методике.

В работе приводятся результаты численных исследований двух реальных конструкций актюаторов сложной геометрической формы, физико-механические свойства которых приведены в Таблице 1.

Таблица.1.

Физико-механические свойства реальных исследуемых актюаторов.

ТБ элемент	Материал слоя		E ₁ , ГПа	E ₂ , ГПа	α ₁ (*10 ⁶ 1/С°)	α ₂ (*10 ⁶ 1/С°)	μ
	активного	пассивного					
Патент США №4160226	24НХ	36Н	190	150	18	1	0.3
ООО «Калужский завод автоприбор»	19НХ	36Н	195	150	17	1.3	0.3

Первый актюатор представляет собой куполообразный элемент в виде полой оболочки вращения с U-образной прорезью и язычком в центре лопасти (патент США №4160226) (Рис. 9). Второй актюатор представляет собой грушевидную сферическую оболочку с U-образной прорезью и язычком с П-образным выступом, расположенным в центре лопасти (ОАО «Калужский завод Автоприбор») (Рис. 10). Толщина элементов 0.2 мм.

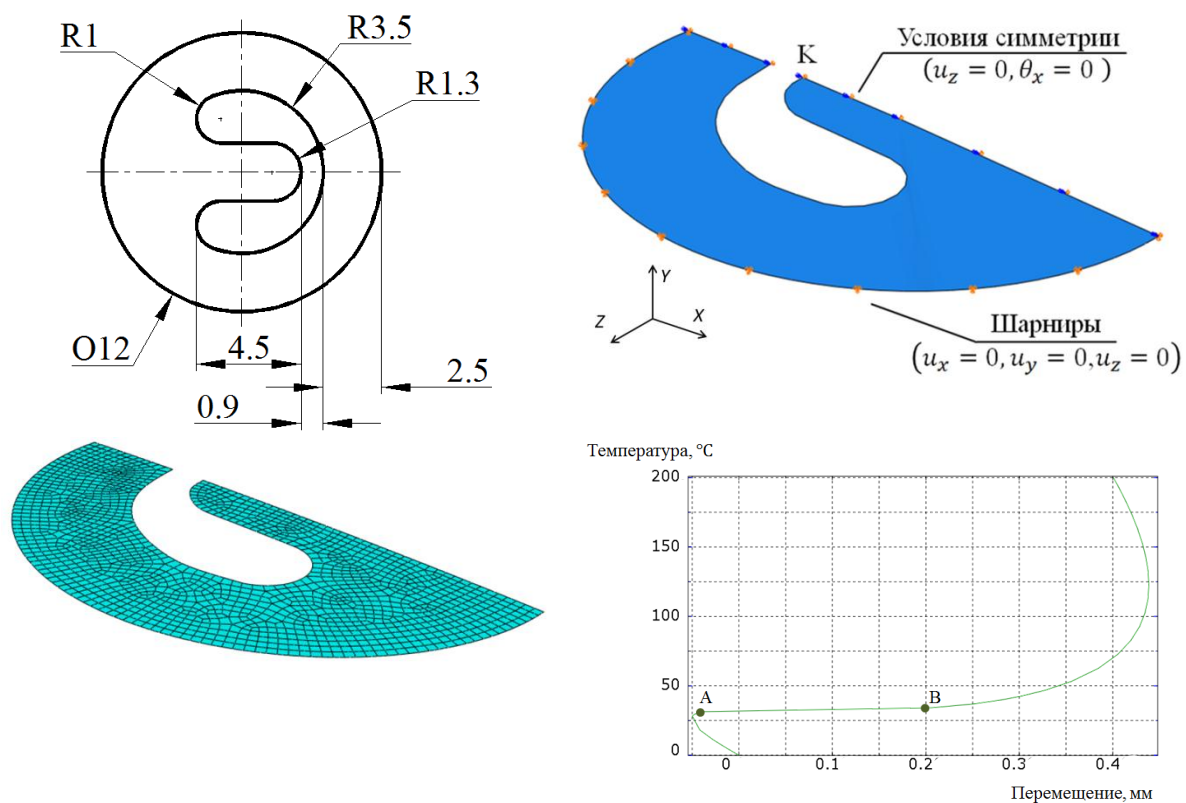


Рис. 9. Геометрические размеры, математическая и конечно-элементная модели актюатора сложной формы и его упругая характеристика (патент США № 4160226)

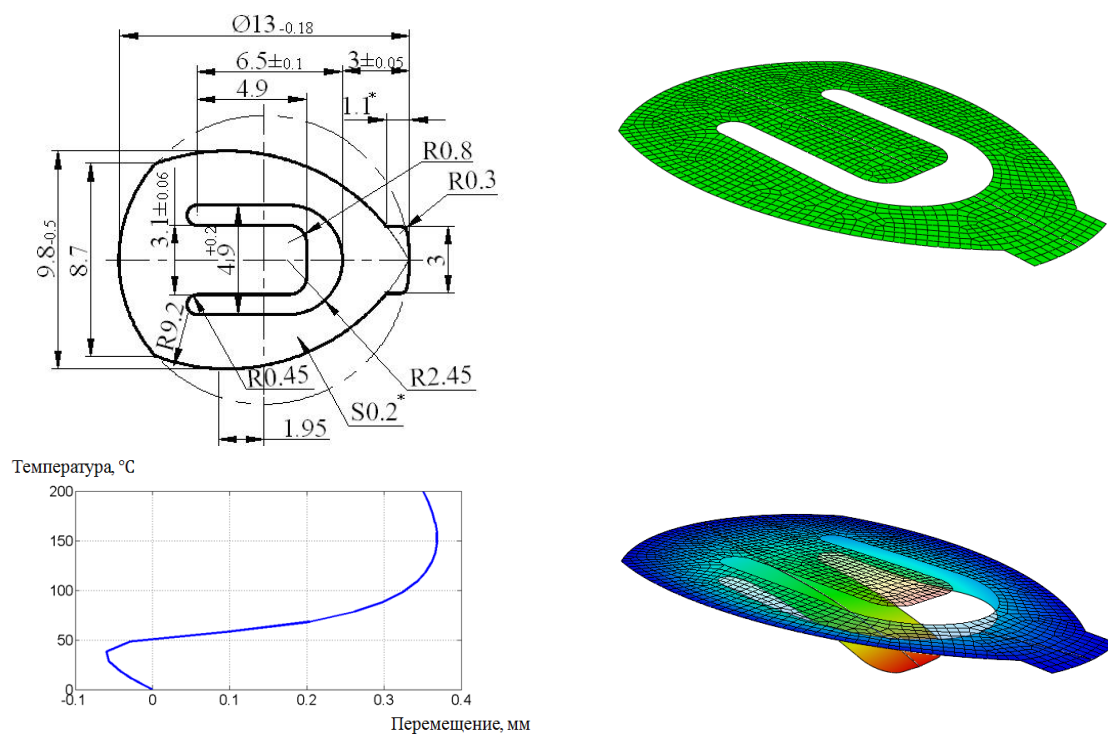
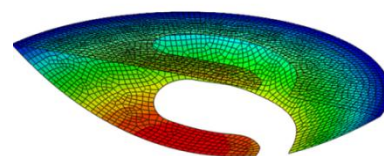
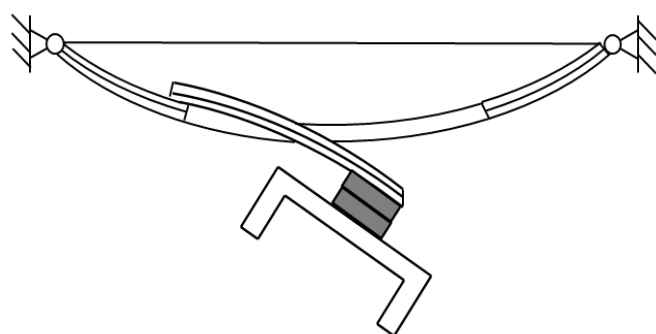


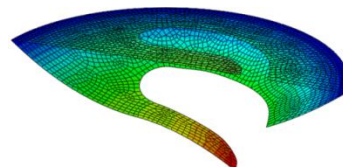
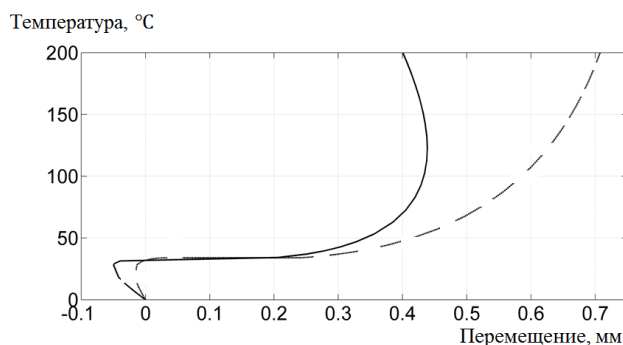
Рис. 10. Геометрические размеры, конечно-элементная модель актюатора сложной формы и его упругая характеристика и деформированная форма при температуре 65 С (ООО «Калужский завод автоприбор»)

В результате анализа параметров и рабочих характеристик рассмотренных актюаторов была предложена новая актюатора (Рис. 11), состоящей из двух частей, соединенных друг с другом сваркой или заклепками: пластинчатого куполообразного элемента и язычка с размещенным на нем электрическим контактом. Пластинчатый куполообразный элемент выполнен в виде полой оболочки вращения и имеет центральное отверстие. Один конец язычка жестко соединен с краем отверстия в пластинчатом куполообразном элементе, а подвижный конец расположен в отверстии пластинчатого куполообразного элемента.

Куполообразный элемент и язычок выполнены из биметалла и обращены друг к другу пассивными слоями. Проведено сравнение работоспособности предложенной конструкции с существующими переключателями. Значения полезных перемещений характерных точек актюатора новой конструкции превышает значения полезных перемещений актюаторов существующих конструкций (Рис. 11).



Деформированная форма актюатора существующей конструкции (патент США № 4160226)



Деформированная форма актюатора предложенной конструкции

Рис. 11. Новая конструкция актюатора с язычком, сравнение деформированных форм и упругих характеристик актюатора существующей конструкции (сплошная линия) и актюатора новой предложенной конструкции (пунктирная линия)

Предложенная конструкция позволяет варьировать величины полезного перемещения свободного края щелкающего язычка и контактного усилия, а также устранить явление дребезга. Конструкция защищена патентом на полезную модель.

Решена задача определения оптимальных параметров актюатора с язычком для реализации прохлопывания при температуре, равной 40°C.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют об эффективности предложенной методики и возможности ее применения при расчете и проектировании устройств, использующих актюаторы с дискретной характеристикой.

Основные результаты и выводы

1. Предложена методика численного анализа и синтеза актюаторов дискретного действия, позволяющая совершенствовать существующие и создавать новые конструкции актюаторов с заданными параметрами.
2. Разработано программное обеспечение для расчета и проектирования актюаторов: программа «Актюатор 1.0» – для анализа осесимметричных актюаторов, программа «Актюатор 2.0» – для синтеза осесимметричных актюаторов, макрос в Matlab – для синтеза актюаторов сложной формы.
3. Достоверность результатов, полученных с помощью авторской программы, подтверждена посредством сравнения с известными решениями эталонных задач, результатами решения в конечно-элементном комплексе и экспериментальными данными.
4. С помощью авторской программы и конечно-элементного комплекса ANSYS 14.5 получены новые результаты для задач нелинейного деформирования актюаторов, показывающие влияние основных конструктивных параметров на рабочую характеристику устройств.
5. Созданы параметрические модели многопараметрических актюаторов и актюаторов сложной формы, с помощью которых была решена задача синтеза для определения рациональных параметров актюаторов электротехнических устройств.
6. Подготовлены рекомендации по проектированию существующих конструкций актюаторов, подана патентная заявка на полезную модель новой конструкции актюатора, позволяющую существенно повысить его эксплуатационные качества.

Публикации по теме диссертации Николаевой (Подкопаевой) А.С.

1. Расчет перспективных конструкций актюаторов / А.С. Николаева [и др.] // Известия ВУЗов, Машиностроение. 2015. № 8 (665). С.73-78. (0.375 п.л. / 0.375 п.л.)
2. Гаврюшин С.С., Макмиллан А., Подкопаева А.С. Синтез микроактюатора дискретного действия по заданным функциональным параметрам // Известия ВУЗов, Машиностроение. 2014. № 1 (646). С. 55-60. (0.375 п.л. / 0.35 п.л.)

3. Подкопаева А.С. Анализ процесса деформирования микроактюатора // Известия высших учебных заведений, Машиностроение. 2012. № 5. С. 10-14. (0.3125 п.л.)
4. Подкопаева А.С. Исследование рабочей характеристики термобиметаллического микроактюатора // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2011. URL. <http://technomag.bmstu.ru/doc/220677.html> (дата обращения: 25.10.2015) (0.375 п.л.)
5. Николаева А.С. Расчет биметаллического микроактюатора сложной формы // Инженерный вестник. 2014. URL. <http://engbul.bmstu.ru/doc/750324.html> (дата обращения: 25.10.2015) (0.5 п.л.) (0.5 п.л.)
6. Николаева А.С. Подкопаев А.С. Расчет процесса нелинейного деформирования гофрированных мембран // Машины и установки. Проектирование, разработка и эксплуатация. 2015. URL. <http://maplantsjournal.ru/doc/790843.html> (дата обращения: 25.10.2015) (0.375 п.л. / 0.375 п.л.)
7. Gavriushin S.S., McMillan A., Podkopaeva A.S. Discrete action micro-actuator optimization // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. URL. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/74/1/012011/meta> (дата обращения: 25.10.2015) (0.4375 п.л. / 0.3 п.л.)
8. Гаврюшин С.С., Николаева А.С., Подкопаева Т.Б. Расчет перспективных конструкций термобиметаллических оболочечных элементов // Материалы XXI Международного Симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова. Москва. 2015. С.19. (0.125 п.л. / 0.1 п.л.)
9. Подкопаева А.С., Гаврюшин С.С. Расчет исполнительного элемента мехатронного устройства дискретного действия // Материалы XIX Международного Симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Москва. 2013. С. 65-67. (0.125 п.л. / 0.1 п.л.)
10. Подкопаева А.С. Анализ процесса нелинейного деформирования микроактюатора // Конференция «Проблемы механики современных машин»: Сборник докладов. Улан-Удэ. 2012. С. 60-66. (0.125 п.л.)