**ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА СИНТЕЗА МЕХАТРОННЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОУСТРОЙСТВ**

Разработка методов и методик учёта влияния упругих подвесов пьезоустройств на их статические и динамические характеристики

Руководитель НИР: кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник А.Н. Виноградов

В отчете за 2018 год представлены результаты разработки методов и методик учёта влияния упругих подвесов пьезоустройств на их статические и динамические характеристики в рамках разработки экспертной системы синтеза мехатронных пьезоэлектрических микроустройств.

 Актуальность работы. Из литературы и проведенных экспериментальных исследований известно влияние упругой жесткости подвесных элементов на параметры пьезоэлектрических устройств, работающих в статическом и динамическом режимах. Подвесы активных элементов известных пьезоустройств имеют различные габариты и форму. Подробные фундаментальные исследования упругих свойств подвесных элементов пьезоприводов в известной литературе отсутствуют. В настоящей работе проведено глубокое аналитическое и численное моделирование подвесов различных форм и определены их упругие характеристики; разработаны предложения по их оптимизации и представлены результаты в форме, достаточной для интегрирования в экспертную систему.

Целью работы является:

– расширение функционала экспертной системы за счет учета влияния элементов крепления пьезоустройств;

– повышение надёжности работы пьезоэлектрических микроустройств, работающих в статическом и динамическом режимах, путём оптимизации элементов крепления;

– повышение чувствительности резонансных пьезодатчиков путем моделирования специальных форм подвесов.

Научная ценность работы состоит в разработке научно-методических основ построения компьютерной системы моделирования многослойных пьезоприводов.

Научно-техническая ценность работы состоит в создании методики оценки упругих характеристик подвесов.

Практическая ценность ожидаемых результатов работы заключается в расширении возможностей компьютерной системы для моделирования многослойных пьезоприводов. На основе разработанных методик оценки упругих свойств подвесов создана программа для ЭВМ по моделированию оптимальных по динамическим параметрам резонаторов с упругими подвесами. Предполагается включение данного модуля в состав компьютерной системы «ПьезоЭксперт».

В рамках работы на настоящий момент выполнены все пункты 1-4 согласно техническому заданию и предложенному плану-графику:

– проведена систематизация известных форм подвесных элементов пьезоустройств на основе мониторинга публикаций и анализа работ по подвесам в пьезоэлектрических устройствах;

– разработаны испытательный стенд и комплект экспериментальных образцов с различными вариантами подвесов;

– разработаны методики расчета упругих свойств трёхмерных подвесов различных форм;

– разработан уникальный алгоритм программы для ЭВМ по моделированию пьезоактюаторов с упругими подвесами;

– создана, отлажена и протестирована новая программа для ЭВМ по моделированию пьезорезонаторов с упругими подвесами;

– получено новое аналитическое соотношение в теории биморфов фундаментального характера;

– выполнены экспериментальные испытания пьезоактюаторов с различными подвесами;

– выполнено численное и аналитическое моделирование пьезоустройств с различными подвесами;

– проведено исследование влияния свойств подвесов на температурный ход пьезопривода.

В результате проведения работы достигнуто повышение эффективности проектирования мехатронных пьезоэлектрических микроустройств и расширение возможностей экспериментальной базы.

В данном отчете, состоящем из семи разделов, представлены результаты по этапам 1-4 НИР, посвященной разработке методов и методик учёта влияния упругих подвесов пьезоустройств на их статические и динамические характеристики. На базе разработанных аналитических методик запланировано создание программы для ЭВМ для углубления исследований.

 В разделе 1 представлены результаты аналитического обзора по тематике исследования, который позволил установить, что все разнообразие форм подвесов чувствительных элементов, представленное в литературе, можно свести к нескольким типам: диафрагмы (мембраны), стержни и хомуты (кольца), торсионы и др. По способу крепления подвески можно разделить на консольные и двухопорные. Установлено, что одной из ключевых характеристик подвески является упругость, а также равенство коэффициентов жесткости на кручение и изгиб. Большое значение имеет устойчивость к колебаниям температуры, сотрясениям, временная стабильность свойств и технологичность изготовления.

В разделе 2 рассмотрена методика измерения амплитудно-частотных характеристик пьезорезонаторов с помощью специально разработанного программно-аппаратного комплекса (стенда, состоящего из генератора сигналов Tektronix AFG3021B, осциллографа Tektronix MSO 2024 и компьютера с программой LabView Signal Express TE (v.2.5.1). Для апробации методики были исследованы динамические характеристики (собственные частоты) макета двухмембранного пьезопривода. Обнаруженные в ходе исследования собственные частоты изгибных колебаний пьезопривода в рабочем режиме согласуются с результатами математического моделирования.

В разделе 3 представлены методики расчёта трёхмерных подвесов, построенные на основе уравнений теории упругости. В частности, приведены алгоритмы расчета жесткости стержневой, рамочной и пружинной подвесов. Методом конечных элементов смоделирована кольцевая подвеска и определены её коэффициенты упругости.

В разделе 4 представлены алгоритм и описание программы для ЭВМ по моделированию пьезорезонаторов с упругими подвесами. Проведено её тестирование и примеры моделирования. При численном экспериментировании с помощью созданной программы обнаружена неочевидная особенность биморфного актюатора – величина изгибающего момента, имеющего пьезоэлектрическую природу, оказалась не зависящей от толщины активного слоя, на который подаётся управляющее напряжение. Приведено теоретическое обоснование этого эффекта, имеющего фундаментальный характер. Он позволяет расширить возможности мехатроники при создании пьезоэлектрических микроустройств со слоями нанометровой толщины. Сдана заявка в ФИПС на регистрацию программы для ЭВМ.

В разделе 5 исследован ряд моделей дисковых мембранных пьезоприводов: одномембранная модель (проведен статический МКЭ расчет и сравнение с натурным экспериментом), двухмембранная модель (проведен модальный МКЭ расчет и сравнение с натурным экспериментом), шестимембранная модель (проведен статический и динамический МКЭ расчеты). Результаты, полученные в ходе численных и натурно-экспериментальных исследований, показывают высокую согласованность.

Метод конечных элементов позволил получить более широкий спектр результатов при исследовании двухмембранного пьезопривода по сравнению с натурно-экспериментальным методом. Установлено значительное влияние способа закрепления пьезомембран на частоты собственных колебаний.

Проведены статические и динамические расчеты конечноэлементной модели пьезоблока диаметром 35 мм и высотой 31 мм, состоящего из шести пьезоприводов, стянутых между собой винтами с промежуточными втулками. В ходе динамических расчетов определена основная частота изгибных колебаний модели пьезоблока, f3 = 2,883 кГц и соответствующая ей форма колебаний. В ходе статических расчетов определен коэффициент преобразования модели пьезоблока, равный 48,9 нм/В (перемещение 4,89 мкм при напряжении V = 100 В). Величина блокирующей силы модели пьезоблока составляет –10,63 Н при напряжении V = 100 В (коэффициент преобразования составил 0,106 Н/В).

В разделе 6 представлена методика оценки влияния подвесов на температурный ход пьезоприводов. Приведены экспериментальные результаты динамических испытаний резонаторов из плавленого кварца с пьезокерамикой в диапазоне температур от –20 до +100С. Наибольший температурный уход резонансных частот составил 10%.

В разделе 7 приведены материалы по подготовке к регистрации программы для ЭВМ, дано обобщение результатов по созданию программного комплекса, приведено обоснование важности аналитических методов как эталонных.

По результатам исследований опубликована статья A.Vinogradov, Y.Matveev, R.Lubchenko, P.Titov A Comparison of Axisymmetric Models of Multilayer Piezo Actuators for the Creation of Annular Strain Waves // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. – №. 13(4). – С. 940-953 в рецензируемом журнале, включенном в перечень Web of Science, Scopus.

 Получено Свидетельство РФ № 2018612929 о регистрации Программы для ЭВМ Моделирование собственных колебаний двухмембранного пьезопривода SOBKOL2M. – Правообладатель ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2018.

Рекомендации по использованию НИР:

- разработка технических заданий для прохождения преддипломной практики студентов магистратуры;

- разработка технических заданий для выпускных квалификационных работ магистрантов МИЭМ НИУ ВШЭ;

- разработка технических заданий для НИР студентов МИЭМ НИУ ВШЭ

- консультации магистрантов и аспирантов.

В результате проведения работы достигнуто повышение эффективности проектирования мехатронных пьезоэлектрических микроустройств и расширение возможностей экспериментальной базы.