

## **СОЗДАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЦЕНКИ НАЛИЧИЯ ТИПОВЫХ ДЕФЕКТОВ В КОНСТРУКЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕСТОВЫХ ИСПЫТАНИЙ И ПРИГОДНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Рассмотрены методики моделирования статического и динамического поведения микро-электромеханических систем. Проведены вычислительные эксперименты по анализу параметров вынужденного движения электромеханической системы с различными дефектами формы и свойств с учетом различных условий нагружения. Произведена оценка возможности повышения точности измерений микродатчика посредством учета влияния дефекта на вынужденное движение системы и последующей компенсации подобного влияния. Создана удобная для практического применения в профильных организациях технология оценки наличия типовых дефектов в конструкции по результатам тестовых динамических испытаний и пригодности изделий для дальнейшей эксплуатации.

**Ключевые слова:** микромеханика, дефекты формы и свойств, вынужденное движение, связанные задачи, теория упругости, электростатика, методика расчета.

Исследование ориентировано на разработку алгоритмов решения связанных нестационарных электромеханических и термомеханических задач, позволяющих исследовать и прогнозировать параметры вынужденного движения и основные характеристики динамических систем, содержащих дефекты формы или свойств материала. Целью работы является создание новой расчетной технологии оценки условий возможной эксплуатации микроэлектромеханических систем (MEMS), имеющих дефекты геометрии и свойств, например заготовок для микрогироскопов или микроакселерометров.

В процессе практической реализации алгоритмов решения связанных электротермовязкоупругих задач и динамических задач МДТТ автором были созданы методики, направленные на изучение влияния возможных технологических дефектов и неблагоприятных факторов, характерных для рассматриваемых MEMS-систем, а также методики, позволяющие прогнозировать свойства конструкций с дефектами формы и свойств. Практически все поставленные задачи потребовали для поиска решений применения численных алгоритмов. В силу выраженной дифференциации применяемых методов и подходов, заложенной

в работу еще на этапе построения математических моделей рассматриваемых микромеханических устройств, возможно выделение двух подходов к исследованиям поставленных проблем: инженерной методики численного анализа и методики анализа на основе конечно-элементных моделей.

## **1. Инженерная методика численного анализа**

Методика основана на представлении объекта исследования в виде системы, состоящей из абсолютно жестких тел, соединенных упругими связями. Определяющие соотношения, лежащие в основе математической модели динамического поведения объекта, выводятся из уравнения Лагранжа 2-го рода [1]. Дальнейшая работа с моделью требует решения неоднородной системы дифференциальных уравнений, включающей в себя до десятка степеней свободы, в качестве метода решения рационально применять метод Рунге–Кутты или его аналоги.

Коэффициенты неоднородной системы дифференциальных уравнений, характеризующие деформационные свойства упругих подвесов и инерционные свойства массивных элементов MEMS-системы, определяются из решения вспомогательных задач о деформировании систем с распределенными параметрами (балки, пластинки, стержни и т.д.) или на основании конечно-элементного моделирования элементов конструкций с учетом их реальной сложной пространственной формы и с учетом особенностей физико-механических свойств материалов. Оба описанных подхода применены в данной работе. В частности, при анализе вынужденных колебаний механической системы на примере упрощенной модели микрогироскопа с дефектами для определения жесткостных характеристик упругого подвеса применялись трехмерные конечно-элементные модели торсионов.

Построение моделей квазистатического деформирования MEMS-систем основано на тех же принципах.

Предложенные в рамках исследования численные алгоритмы реализованы в виде пакета прикладных программ на базе математического пакета MATLAB. Основные элементы инженерной методики численного анализа представлены схематично на рис. 1. Алгоритм предполагает возможность организации циклического процесса счета, позволяющего осуществлять ряд вычислительных экспериментов и последующих анализов для конструкции с варьируемыми геометрическими размерами и физико-механическими характеристиками.

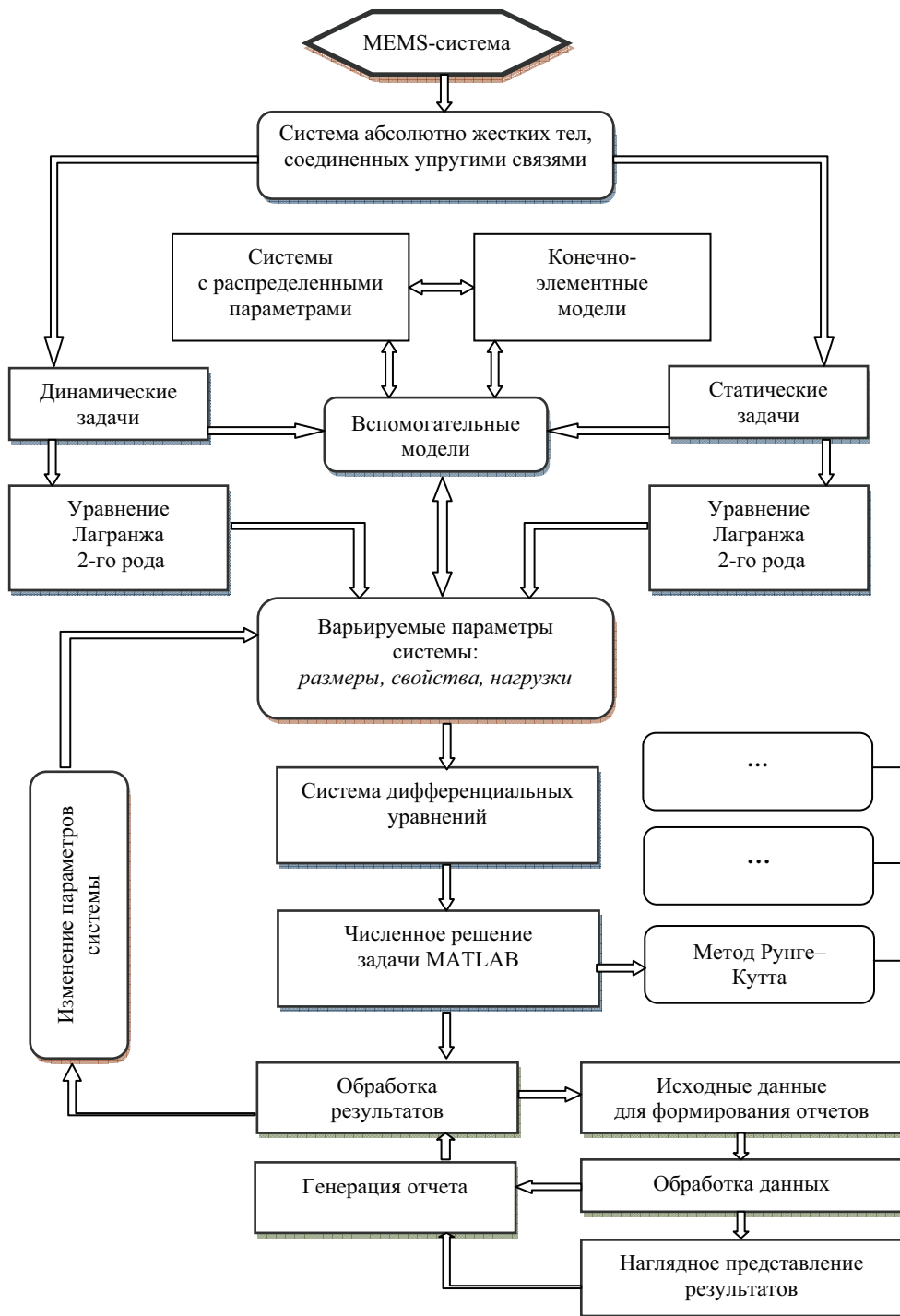


Рис. 1. Алгоритм инженерной методики численного анализа

Разработанный пакет проблемно-ориентированных программ предназначен для использования в технологических и конструкторских отделах профильных организаций. С его помощью можно проводить оценку влияния возможных дефектов на параметры исследуемой системы, создавать «паспорт» дефектов, оценивать пригодность изделий с дефектами для дальнейшей эксплуатации.

На основании предложенной методики в работе [2] осуществлен анализ влияния дефектов в виде отклонения от проектировочных жесткостных и инерционных характеристик динамической системы на параметры вынужденных колебаний чувствительного элемента микрогирроскопа. Элементы предложенной методики и свойственные ей характерные подходы применены при исследовании влияния электростатических сил на поле перемещений чувствительного элемента, проведенном на инженерной электромеханической модели микроакселерометра с поступательным движением чувствительного элемента [3].

Общие достоинства предложенной инженерной методики численного анализа заключаются в удобстве работы с упрощенными моделями, возможности наглядного отображения результатов расчетов; малом времени работы применяемых численных алгоритмов; низких требованиях к техническим характеристикам используемой вычислительной техники, ПЭВМ; низких требованиях к квалификации специалиста, осуществляющего аналитическую работу по предложенной методике.

## **2. Методика анализа на основе конечно-элементных моделей**

В основе предложенной методики лежит подход, при котором построение математических моделей MEMS-систем производится на основе наиболее общих определяющих соотношений теории термовязкоупругости, электро- и магнитостатики, МЖГ и т.д. Это позволяет отказаться от использования интегральных характеристик твердых тел (масса, моменты инерции, обобщенные жесткости и пр.) и описать особенности деформирования элементов MEMS-систем более подробно.

Применение наиболее обобщенных трехмерных определяющих соотношений приводит к необходимости численного решения связанных междисциплинарных краевых задач. В качестве метода решения предлагается использовать метод конечных элементов. Общий алгоритм проведения трехмерного конечно-элементного анализа, представленный на рис. 2, включает следующие позиции:

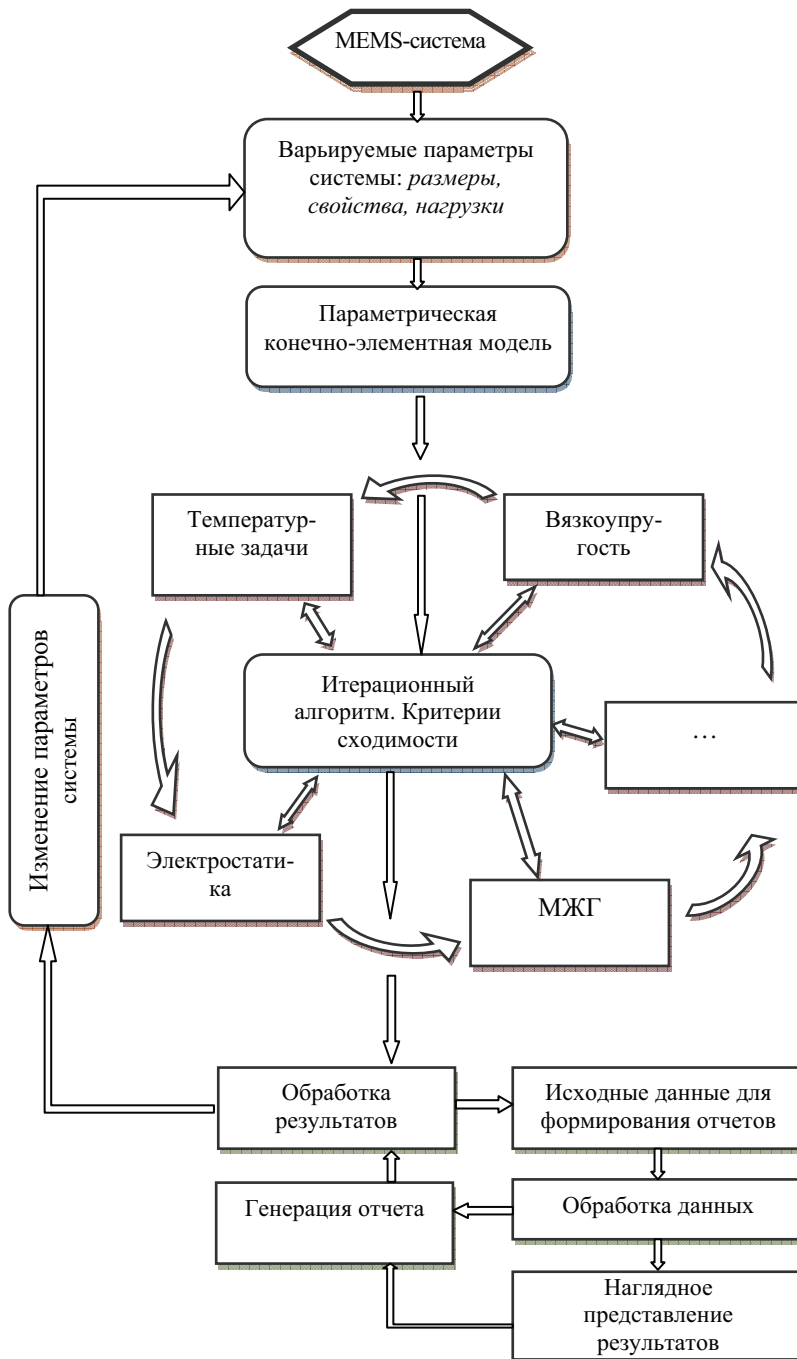


Рис. 2. Алгоритм методики анализа на основе конечно-элементных моделей

- создание параметрической конечно-элементной модели MEMS-системы;
- организация циклического попеременного итерационного решения связанных через силовые и кинематические граничные условия задач МДТТ, электростатики и т.д.;
- постобработка результатов расчета, представление результатов в наглядном виде, формирование отчетов;
- внесение изменений в параметрическую конечно-элементную модель MEMS-системы и повторный запуск численного алгоритма.

Для проведения исследований и практических расчетов в рамках предложенной методики был создан проблемно ориентированный пакет программ на языке APDL для конечно-элементного пакета ANSYS.

Разработанный пакет программ был применен для определения влияния дефекта в упругом подвесе микрогироскопа на динамические параметры системы [4]. Несмотря на то, что в работе [4] рассмотрен дефект в виде отклонения геометрических размеров, предложенная методика в силу общности метода конечных элементов может быть применена и для анализа влияния на динамические параметры дефектов, приводящих к изменению физико-механических свойств среды.

Предложенные методики решения и анализа связанных трехмерных задач были применены для анализа влияния температурных и электростатических полей на деформирование чувствительного элемента многослойного микроакселерометра с различными физико-механическими свойствами слоев [5].

### **3. Практические результаты применения предложенных методик**

Предложенные методики численного анализа динамического и статического поведения MEMS-систем позволили оценить возможность повышения точности измерений, учитывая влияние дефектов и неблагоприятных факторов на вынужденное движение системы и последующую компенсацию подобных влияний.

Для предложенных математических моделей различных конструкций микромеханических гироскопов и акселерометров выполнены численные расчеты и проведен анализ результатов. Выполнен анализ влияния электростатических и температурных полей на перемещения чувствительных элементов MEMS-систем, определено влияние типовых дефектов, свойственных микромеханическим конструкциям, на

деформирование конструктивных элементов датчиков и на параметры их свободного и вынужденного движения. Подробный анализ найденных влияний и зависимостей приведен в работах [2, 3]. Обобщим полученные ранее результаты. В качестве причин, вызывающих появление погрешностей в выходных сигналах датчиков, автором рассматриваются: наличие дефектов, обусловленных несовершенством технологии производства MEMS-систем, а также влияние неблагоприятных факторов, таких как воздействие температурных и электростатических полей на чувствительные элементы микродатчиков.

Присутствующие в структуре MEMS-систем дефекты в виде отклонения размеров отдельных конструктивных элементов от проектировочных, а также в виде локальных изменений физических свойств материалов изменяют жесткостные и инерционные характеристики конструкции и тем самым оказывают влияние на статические и динамические характеристики датчиков, что вызывает возникновение погрешности измерений в их выходном сигнале.

Компенсация негативного влияния дефектов структуры и свойств возможна двумя способами: 1) применение фильтров и корректировка выходного сигнала датчика, основанная на известном оцененном ранее вкладе дефекта в выходной сигнал; 2) механическое исправление дефектного конструктивного элемента. Оба эти варианта рассмотрены в процессе исследования. Показана возможность определения дефекта и его величины по ряду динамических испытаний, что позволяет в итоге осуществить компенсацию его влияния. Подобная задача не является однозначной, однако в ряде случаев позволяет получить желаемый результат. Механическая корректировка дефекта и связанные с ней особенности рассмотрены в работе [4]. Показано, что подобная корректировка позволяет получить конструкцию с исправленными и приведенными к проектировочным динамическими параметрами (в частности, собственной частотой колебаний). Однако механическая корректировка приводит к изменению ряда иных параметров системы, в частности сказывается на собственных формах колебаний, что может стать существенным осложняющим фактором для измерительных динамических систем. В работе [4] показано, что подобные эффекты не приводят к серьезным изменениям и работоспособность конструкции сохраняется.

Рассматривается также влияние неблагоприятных факторов – электростатических и температурных полей

Погрешности в выходной сигнал датчиков вносят зачастую не учитываемые при проектировании, но оказывающие влияние на чувствительный элемент и иные конструктивные элементы MEMS-систем, внешние электростатические и температурные поля.

На сегодняшний день в ряде MEMS-систем применяется система температурной компенсации, основанная на ряде физических принципов и тесно связанная с измерительной системой датчика. Недостаток подобного подхода – узкая специализация таких систем, ограниченная законами и закономерностями, заложенными в нее на этапе проектирования.

Температурное поле приводит к возникновению напряженного состояния и появлению деформаций в двухслойном неоднородном чувствительном элементе. Подобные явления могут быть вызваны не только температурным полем, но и любыми другими видами воздействия, приводящими к возникновению в теле предварительного напряженного состояния.

Электростатические взаимодействия, вызванные возникновением сил Кулона между противоположно заряженными обкладками конденсатора, одной из которых является маятник микродатчика, приводят к отклонению чувствительного элемента датчика и тем самым к появлению погрешности измерений. В случае работы датчика в режиме прямого измерения сигнала, когда информация о внешнем воздействии снимается на основании отклонения чувствительного элемента от положения равновесия, возможна фильтрация, анализ и корректировка выходных данных датчика.

В работе [5] получены результаты, отражающие влияние температурных и электростатических полей на положение и форму чувствительного элемента микроакселерометра. Определено, что погрешности, вызванные влиянием полей, являются величинами одного порядка. Вносимая ими погрешность может достигать величины в несколько процентов при определенных неблагоприятных условиях, которыми являются состояния близкого взаимного расположения, в случае действия больших нагрузок, противоположно заряженных чувствительного элемента и неподвижного основания. Кроме того, проявление негативного влияния полей возможно в случае малых нагрузок, когда чувствительный элемент находится вблизи положения



равновесия и перемещения маятника, вызванных неблагоприятными воздействиями, существенных по отношению к перемещениям, создаваемым измеряемой внешней инерционной нагрузкой. Учет рассмотренных неблагоприятных факторов может привести к повышению точности измерений датчиков. Реализация подобного подхода может быть выполнена в виде коррекции выходного сигнала датчика, основанной на математических методах обработки сигналов, либо иным способом. Заметим, что полученные в работе [5] зависимости близки к линейному закону на достаточно большом интервале, не включающем области, характеризующие работу системы при больших внешних нагрузках, что должно существенно упростить процедуру корректировки.

#### **4. Итоги исследования**

В рамках исследования проведены вычислительные эксперименты по анализу параметров вынужденного движения электромеханической системы с различными дефектами формы и свойств с учетом различных условий нагружения, в том числе с учетом связанного электромеханического взаимодействия.

На основании предложенных методик:

- получена оценка возможности повышения точности измерений микродатчика посредством учета влияния дефекта на вынужденное движение системы и последующую компенсацию подобного влияния;
- установлены закономерности влияния температурного поля на рабочие характеристики микромеханических конструкций, в частности даны оценки погрешностей сигнала в микроакселерометре с двухслойным неоднородным чувствительным элементом;
- обобщены установленные на основе численных исследований закономерности в виде зависимости параметров вынужденных колебаний системы (амплитуда колебаний, сдвиг фазы, различные переходные процессы) и динамических характеристик системы (собственные частоты и формы колебаний, амплитудно-частотная характеристика и пр.) от типа дефекта, его величины и местоположения. Разработаны подходы к созданию «паспорта» дефектов конструкции.

Совокупность разработанных методик можно интерпретировать как удобную для практического применения в профильных организациях технологию оценки наличия типовых дефектов в конструкции

по результатам тестовых испытаний и пригодности изделий для дальнейшей эксплуатации.

Некоторые элементы предложенных методик и основные результаты их применения, в частности:

– методика и алгоритм анализа характеристик статического и динамического поведения микрогироскопов и микроакселерометра, содержащих различные дефекты формы и свойств;

– установленные закономерности по влиянию геометрического дефекта формы торсиона микромеханического гироскопа на собственные частоты и формы колебаний, а также на амплитуды установившихся вынужденных колебаний чувствительного элемента датчика;

– методика и результаты проведения вычислительного эксперимента по анализу влияния температурных и электростатических полей на статические характеристики чувствительного элемента микромеханического акселерометра, приняты к использованию на профильном предприятии ОАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» (ОАО ПНППК, г. Пермь).

#### **Библиографический список**

1. Максимов П.В. О некоторых подходах к построению моделей вынужденного движения микроакселерометра // Вестник ПГТУ. Механика. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – №1. – С. 55–71.

2. Максимов П.В. Исследование влияния типовых дефектов конструкций на динамические характеристики MEMS-систем // Вычислительная механика: сб. науч. тр. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – Вып. 6.

3. Мирзина Н.А. , Максимов П.В. Аналитическое решение связанной задачи об отыскании поля перемещений чувствительного элемента акселерометра с учетом влияния электростатических сил // Вестник ПГТУ. Механика. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – № 1. – С. 112–121.

4. Максимов П.В., Труфанов Н.А. Численное исследование влияния дефекта упругого подвеса на динамические характеристики микромеханического гироскопа // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2009. – № 2. – С. 39–45.

5. Максимов П.В., Труфанов Н.А. Численный анализ влияния электростатических и температурных воздействий на деформационные характеристики слоистого чувствительного элемента микроакселерометра // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2009. – Т. 15, №4.

Получено 01.07.2011.

**P.V. Maksimov**

Perm national research polytechnic university

**DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF AN ESTIMATION  
OF PRESENCE OF TYPICAL DEFECTS IN A DESIGN BY  
RESULTS OF TESTS AND SUITABILITY OF PRODUCTS  
FOR THE FURTHER OPERATION**

The methods for modeling static and dynamic behavior of micro-electro-mechanical systems was shown. Computing experiments under the analysis of parameters of the forced movement of electromechanical system with various defects of the form and properties taking into account various conditions of loads were made. The assessment possibility of increasing the accuracy of measurements by microsensors with into account the effect of the defect on the forced motion of the system and the subsequent compensation of such influence was performed. The technology of an estimation of presence of typical defects in a design by results of tests and suitability of products for the further operation was created.

**Keywords:** MEMS, defects of shapes and properties, forced motion, coupled problem, theory of elasticity, steady-state electricity, design procedure.