

в ответ на вх. № 430-10-425  
от 03.04.15 г.

В Диссертационный Совет Д 212.125.02  
при Московском авиационном институте  
(национальном исследовательском университете)

Отзыв официального оппонента к.т.н., и.о. ведущего научного сотрудника  
ОАО «Российские космические системы» Козлова Дмитрия Владимировича  
(адрес: 111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 53, тел.: +7 (495) 673-93-87, e-mail: risc3@mail.ru)  
на диссертацию Косолапова Ильи Алексеевича  
«Маршрут автоматизации системного проектирования  
микрооптоэлектромеханических систем»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.13.12 – «Системы автоматизации проектирования  
(в электронике, радиотехнике и связи)».

### **1. Актуальность темы**

Работа посвящена современным методам разработки и проектирования устройств микромеханики, в том числе МОЭМС устройствам, а также вопросам оптимизации процесса моделирования оптических, механических и электрических характеристик в рамках одного программного комплекса. Решение, предложенное в работе, позволяет существенно снизить время и частично автоматизировать процесс разработки подобных устройств.

Автором разработана методология построения математических моделей, оптимизированная для микрооптоэлектромеханических систем. Данный метод позволил совместить конечно-элементный анализ с методами макро моделирования, что позволило учесть различные физические процессы при функционировании устройства, а также снизить требования к вычислительным ресурсам, обеспечив тем не менее высокую степень точности. Разработанный автором маршрут автоматизации системного проектирования является оригинальным и может найти широкое применение в современной технике на стадии моделирования функциональных характеристик физических систем.

Практическая часть исследований в данной работе проведены на примере акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо – устройства современной электронной компонентной базы, разработка которого позволяет значительно снизить энергопотребление при сохранении или улучшении основных выходных характеристик прибора. Без наиболее полного моделирования подобных устройств на ранней стадии разработки невозможно добиться необходимого результата. Особо важными становятся задачи подготовки методологической базы и создания физической модели.

В работе рассмотрен ряд микрооптоэлектромеханических устройств, на которых и были отработаны предложенные принципы моделирования. Внедрение результатов работы на примере конкретных разработок позволяет оценить не только ее теоретическую ценность, но и практическую значимость для электронной промышленности. В связи с вышесказанным, считаю выбранную тему работы актуальной.

## **2. Общая характеристика работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 51 источника.

**Во введении** освещено современное состояние проблемы создания маршрута совместного математического моделирования подсистем различной физической природы. Проведён обзор истории развития и современной методологии разработки микроэлектронных устройств (в том числе МЭМС и МОЭМС). Сформулированы цель и задачи работы, методы исследования, приведены научная новизна и практическая значимость работы, а также результаты внедрения.

**В первой главе** проанализированы различные подходы к математическому моделированию и программные комплексы математического моделирования технических объектов микроэлектроники. В качестве программного комплекса для математического моделирования механической подсистемы выбран ANSYS. В качестве программного комплекса

моделирования оптической и электронной подсистем выбран Matlab с дополнением Simulink. Подробно рассмотрено понятие (концепция) «Интернет вещей» и его роль при разработке рассматриваемых в работе энергосберегающих датчиков на примере микрооптоэлектромеханических акселерометров на основе интерферометра Фабри-Перо.

**Вторая глава** посвящена построению математической модели функционирования микрооптоэлектромеханического акселерометра. Модель содержит в себе описание механической, оптической и электронной подсистем устройства. Модель механической подсистемы представляет собой численную модель с применением САПР Ansys, использующей метод конечно-элементного анализа, и позволяющей с высокой точностью определить выходные характеристики устройства в зависимости от условий его эксплуатации и конструкционных параметров. Математическая модель оптической подсистемы представлена в виде матричных уравнений, решение которых производится в программном комплексе MATLAB/Simulink. Электронная подсистема представлена в виде блок-схемы готовых блоков передаточных функций в программном комплексе MATLAB/Simulink. В работе реализован модуль, позволяющий получать описание механической подсистемы на языке VHDL-AMS и модуль автоматизации процесса получения структуры разрабатываемого устройства на основе введённых параметров.

**Третья глава** посвящена проведению экспериментальных исследований распределённых микрооптоэлектромеханических систем на примере акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо. В САПР Ansys была получена конечно-элементная модель устройства с известными геометрическими характеристиками. Для её построения использовался разработанный модуль автоматизации построения механической подсистемы. С учетом возможных технологических дефектов был произведён поиск собственных частот устройства и построен график их зависимости от технологического разброса геометрических параметров подвижной массы.

Также произведён анализ влияния технологических дефектов на выходные характеристики акселерометра (время отклика системы).

Таким образом, проведённое экспериментальное исследование подтверждает решение задачи получения структуры МОЭМ акселерометра с помощью разработанных и предложенных в работе алгоритмов. Результатом исследования также можно считать установление зависимости влияния технологических дефектов, присутствующих во время операции травления образцов, на собственные частоты и время отклика системы.

**В четвертой главе** проведено экспериментальное исследование влияния технологического разброса геометрических параметров акселерометра на его характеристики с применением разработанного маршрута автоматизации системного проектирования. Разработанный программный модуль позволил повысить качество сетки конечных элементов на начальном этапе моделирования. Предложенный алгоритм учитывает воздействие на структуры устройства при его функционировании и уплотняет сетку в зависимости от степени деформации. Данное решение увеличило точность математического моделирования при незначительном росте количества расчётных узлов, а, следовательно, и времени расчёта. По результатам моделирования сделаны выводы о зависимости времени отклика от технологического разброса параметров толщины, длины и ширины механической подсистемы, что является важным при разработке и отработке технологических операций изготовления акселерометра.

**В заключении** кратко формулируются основные результаты диссертационной работы.

### **3. Достоверность научных результатов работы**

Достоверность подтверждается представленными результатами экспериментов на физических моделях, а также внедрением полученных в работе результатов. Представленные результаты подтверждают эффективность

использования разработанных методов и подходов к системному проектированию микрооптоэлектромеханических устройств.

#### **4. Новизна проведенных исследований и полученных результатов.**

К числу новых решений, полученных в работе, прежде всего можно отнести оригинальный алгоритм многомасштабного моделирования микрооптоэлектромеханических устройств, учитывающий в едином маршруте составляющие различной физической природы. Разработан маршрут автоматизации проектирования подобных устройств, позволивший связать между собой различные компоненты подсистем моделирования. Предложена оригинальная модель оптической подсистемы, основанная на матричных уравнениях.

Несмотря на то, что работа носит больше теоретический характер, стоит отметить полезность работы и в технологическом плане. Разработанная в работе модель акселерометра позволила учесть влияние технологического разброса геометрических параметров на выходные характеристики устройства.

Использование физического моделирования и экспериментальных исследований позволяет значительно снизить требуемое количество экспериментальных образцов и ускорить технологические операции отработки партий до получения требуемых выходных характеристик.

#### **5. Реализация результатов**

Несомненным достоинством диссертационной работы является широкое внедрение ее основных результатов в практику разработки как микрооптоэлектромеханических устройств, так и любых других систем, совмещающих в себе процессы различной физической природы. Результаты работы использованы при выполнении научно-исследовательских работ на базе МГТУ имени Н.Э. Баумана, а также в учебном процессе факультета «Информатика и системы управления» МГТУ имени Н.Э. Баумана.

Изучение опубликованных работ диссертанта показало, что в них с достаточной полнотой отражены основные результаты оппонируемой работы. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

### **6. Замечания и недостатки**

К основным недостаткам работы можно отнести следующие:

– основной акцент в работе сделан на возможность моделирования процессов различной физической природы, однако экспериментальные данные показаны только в части механической подсистемы, не достаёт экспериментальных данных по оптическим и электрическим характеристикам;

– из текста диссертации не ясно, почему при проведении эксперимента была взята заведомо известная геометрия акселерометра, что было источником информации для выбора именно таких геометрических характеристик и по какому принципу они выбирались;

– в главе 4 приведена методика оптимизации сетки конечных элементов в зависимости от степени деформации различных областей модели, однако подобные решения существуют, например, в таких программных продуктах как SolidWorks Simulation (адаптация сетки на основе решения). Так как не проведены обзор и сравнение подобных методов, то не понятно, чем разработанный метод выделяется среди других;

– при сравнении в главе 4 конечно-элементной модели механической подсистемы акселерометра, построенной с использованием стандартных средств Ansys и модели, построенной по предложенному методу оптимизации сетки, приводятся различные типы конечных элементов для каждого метода, что не корректно, так как разработанный метод предполагает лишь изменение размеров элементов в зависимости от степени деформации, а не их типа;

– к формальным замечаниям можно отнести отсутствие в диссертации таблицы 4.7, на которую есть ссылка в тексте, и тот факт, что не все экспериментальные графики имели подписи осей, что затрудняет их «чтение».

## 7. Выводы

Несмотря на указанные замечания, диссертационная работа Косолапова Ильи Алексеевича заслуживает положительной оценки.

Диссертация Косолапова Ильи Алексеевича выполнена на высоком научно-техническом уровне и является законченным исследованием. Автором диссертации решена важная научная задача автоматизации процесса системного проектирования устройств, принцип действия которых основан на эффектах различной физической природы (в частности микрооптоэлектромеханических систем), при снижении требований к вычислительным ресурсам обрабатываемой информации машины.

Основные результаты диссертации опубликованы в ведущих научных журналах, входящих в перечень ВАК и доложены на научных конференциях различного уровня. Автореферат в полном объеме отражает основные положения диссертации.

Диссертационная работа Косолапова Ильи Алексеевича отвечает критериям Положения о порядке присуждения учёных степеней, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования (в электронике, радиотехнике и связи).

Официальный оппонент

к.т.н., и.о. ведущего научного сотрудника

ОАО «Российские космические системы»

  
Д.В. Козлов  
06.04.2015г.

Подпись Козлова Д.В. удостоверяю

к.т.н., ученый секретарь

ОАО «Российские космические системы»



  
С.А. Федотов