

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования «Московский Государственный  
Технический Университет имени Н.Э. Баумана»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)



На правах рукописи

УДК 621.382

Косолапов Илья Алексеевич

**МАРШРУТ АВТОМАТИЗАЦИИ  
СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
МИКРООПТОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность: 05.13.12 – «Системы автоматизации проектирования  
(в электронике, радиотехнике и связи)»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена на кафедре «Проектирование и технология производства электронных средств» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Зинченко Людмила Анатольевна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой вычислительной  
техники Московского Энергетического  
Института Топорков Виктор Васильевич

кандидат технических наук, Козлов Дмитрий  
Владимирович

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»  
имени В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ  
«ЛЭТИ»)

Защита диссертации состоится «28» апреля 2015 г. в 11 час. 40 мин.  
на заседании диссертационного совета Д 212.125.02 при Московском  
авиационном институте (национальном исследовательском университете) по  
адресу: 125993, Москва А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4, зал заседаний  
Ученого Совета МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте [www.mai.ru](http://www.mai.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.02  
к.т.н., доцент



А.М.Петраков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Постоянное усложнение разрабатываемых устройств и датчиков, а так же широкая номенклатура производимых и разрабатываемых устройств требует либо наличия большого числа линий для создания опытных образцов или же линий с возможностью быстрой переналадки технологической оснастки для производства того или иного устройства. Наличие большого числа производственных линий требует финансовых затрат и постоянного обслуживания, однако наличие переналаживаемой оснастки требует затрат времени и высокой квалификации обслуживающего персонала, в то же время частая переналадка оснастки влияет на выход процента годных устройств. Совокупность указанных факторов стала основой для создания специализированного программного обеспечения для разработки, а затем и математического моделирования разрабатываемых устройств.

Дальнейшее развитие микроэлектроники, программного обеспечения для разработки и моделирования привело к появлению комплексов специализированного программного обеспечения, с помощью которого осуществляется разработка и моделирование устройств с различными областями применения (от применения в жидких и агрессивных средах до аэрокосмического применения). Последующее развитие микроэлектроники и микроэлектронных устройств, а так же все большее применение микроэлектронных устройств в повседневной жизни привело к появлению Интернета вещей, где происходит взаимодействие большого числа электронных систем и датчиков в реальном времени. Использование микроэлектромеханических систем (МЭМС) и микрооптоэлектромеханических (МОЭМ) устройств позволяет обеспечить взаимодействие между физическими объектами и виртуальной средой.

МЭМС и МОЭМ устройства базируются на использовании различных физических эффектов: электрических, оптических, механических и др. Экспериментальные исследования таких устройств связаны с большими временными затратами в связи со сложностью создания экспериментальных образцов, что делает разработку алгоритмов моделирования и автоматизированного проектирования подобных устройств актуальной задачей.

Разработка методов, позволяющих выполнить междисциплинарное моделирование МОЭМ устройств в одном программном комплексе позволяет снизить стоимость разработки микросистем за счет уменьшения материальных затрат на проведение экспериментальных исследований, а также повысить процент выхода годных микросистем в серийном производстве. Однако применение существующих САПР для проектирования микросистем затруднено из-за больших вычислительных затрат, связанных с необходимостью решения систем уравнений большой размерности. В связи с этим использование иерархического подхода является актуальным.

Основной тенденцией развития методов математического моделирования является моделирование сложных систем, сочетающих в себе различные физические эффекты, оптические, электрические и механические. Подобные методы моделирования являются междисциплинарными и нетривиальными задачами.

На этапе проектирования сложных микрооптоэлектромеханических систем возникает основная проблема – невозможность моделирования оптических, механических и электрических эффектов в рамках одного программного комплекса, а так же невозможность проведения экспериментального исследования поведения разрабатываемого устройства в рамках одного программного комплекса.

На данный момент решением данной проблемы может стать разрабатываемый маршрут автоматизации системного проектирования микрооптоэлектромеханических систем, позволяющий проводить моделирование разрабатываемого устройства вне зависимости от входных параметров данного устройства и получать в результате структуру разрабатываемого устройства.

**Состояние проблемы.** Основной проблемой является разработка маршрута совместного математического моделирования механической, оптической и электронной подсистем МОЭМ системы, а так же создание адаптированных методов моделирования и проектирования МОЭМ систем, позволяющих проводить моделирование разрабатываемых устройств. Итеративный характер маршрутов проектирования МОЭМ систем накладывает дополнительные ограничения по временным характеристикам этих алгоритмов.

В настоящее время над проблемами междисциплинарного многомасштабного иерархического моделирования и проектирования микросистем работают многие известные ученые, в том числе С. Д. Сентурия в работах по технологиям проектирования и производства МЭМС, Н. Гершенфельд в работах по МЭМС и НЭМС, В.А. Шахнов в работах по МЭМС и неразрушающему контролю, А. А. Жуков в работах в области МЭМС, НЭМС и МОЭМС, А.Д. Коротаев в работах по фундаментальным основам МЭМС и нанотехнологий, В.М. Мальков в работах в области моделирования электромеханических устройств, Г.И. Джанджгава в работах в области МЭМС и НЭМС, и другие.

#### **Цель работы:**

Маршрут автоматизации системного проектирования микрооптоэлектромеханических систем, позволяющий на основе исходных параметров получить в качестве результата структуру микрооптоэлектромеханической системы.

#### **Решаемые задачи:**

1. Разработка алгоритма математического моделирования механической подсистемы МОЭМ акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо с учетом точности воспроизведения механической подсистемы.
2. Разработка математической модели оптической подсистемы для

последующего совместного моделирования МОЭМС на системном уровне.

3. Разработка модуля сопряжения программного комплекса ANSYS и программного комплекса Matlab с применением разработанных программных модулей с целью проведения совместного моделирования механической, оптической и электронной подсистем в одном маршруте проектирования МОЭМС на примере МОЭМ акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо.

4. Разработка маршрута автоматизации системного проектирования МОЭМС с получением в качестве результата структуры МОЭМС.

5. Экспериментальное исследование предложенного маршрута автоматизации системного проектирования МОЭМ акселерометра на примерах микрооптоэлектромеханического акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо и распределенных МОЭМ систем.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач применены численные методы, аналитические методы, теория алгоритмов, методы анализа структуры системы для обеспечения требуемых технических характеристик.

**Научная новизна работы:**

1. Разработаны алгоритмы многомасштабного моделирования МОЭМ систем с применением системного подхода и адаптации конечно-элементной модели механической подсистемы с размерами менее 500 мкм, которые позволяют снизить время получения структуры МОЭМС.

2. Разработан маршрут автоматизации системного проектирования МОЭМС, отличающийся от известных подходов тем, что на основе исходных параметров путем проведения раздельного математического моделирования механической, оптической и электронной подсистем, а затем совместного моделирования полученных математических моделей МОЭМ системы.

3. Разработана математическая модель оптической подсистемы, отличающаяся от известных тем, что основана на решении матричных уравнений, описывающих прохождение светового излучения.

4. Установлена зависимость влияния точности воспроизведения механической подсистемы МОЭМС на собственные частоты механической подсистемы и на выходные характеристики устройства на примере микрооптоэлектромеханического акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо, отличающаяся от известных тем, что учитывает влияние точности воспроизведения как на этапе математического моделирования механической подсистемы, так и на системном уровне.

**Достоверность полученных научных результатов и рекомендаций диссертационной работы подтверждена** результатами экспериментальных исследований на примере микрооптоэлектромеханического акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо:

Полученные в ходе работы результаты достоверно демонстрируют эффективность предложенного алгоритма адаптации методов многомасштабного иерархического моделирования сложных микрооптоэлектромеханических систем на этапе принятия проектных

решений. Данный алгоритм адаптации позволяет повысить эффективность проектирования, а так же получить маршрут автоматизированного проектирования, позволяющий на основе исходных параметров синтезировать математическую модель механической подсистемы на языке VHDL-AMS и повысить качество разрабатываемого устройства на этапе проектного решения с помощью итеративного уточнения параметров на этапе параметрического синтеза.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Маршрут автоматизации системного проектирования микрооптоэлектромеханических систем для получения структуры МОЭМ системы.

2. Алгоритмы многомасштабного моделирования МОЭМ систем с применением системного подхода и адаптации конечно-элементной модели механической подсистемы с размерами менее 500 мкм, которые позволяют снизить время получения структуры МОЭМС.

3. Математическая модель оптической подсистемы, основанная на матричных уравнениях.

4. Зависимость собственных частот механической подсистемы и выходных параметров МОЭМ системы от точности воспроизведения механической подсистемы.

**Практическая ценность работы.** Полученный в ходе работы маршрут автоматизации системного проектирования МОЭМС достоверно демонстрирует, что возможно проектирование в едином маршруте МОЭМ систем с механическими подсистемами с размерами менее 500 мкм, а так же демонстрируют эффективность предложенных алгоритмов. Предложенный алгоритм адаптации позволяет проводить моделирование механической подсистемы МОЭМ систем на основе метода Ланцоша вне зависимости от параметров механической подсистемы и получать математическую модель механической подсистемы, описанную на языке формального описания VHDL-AMS. Разработан программный модуль, позволивший по результатам математического моделирования установить зависимость между технологическими дефектами механической подсистемы и выходными параметрами МОЭМС. Это позволило повысить количество выхода годных, привести выходные характеристики устройства к заявленным.

Полученные результаты исследований использованы при выполнении исследований по грантам Российского Фонда Фундаментальных Исследований (гранты 10-07-0171а и 13-07-00073а). Полученные результаты внедрены в учебный процесс в МГТУ им. Баумана.

**Реализация результатов.**

Полученные результаты исследований использованы при выполнении гранта Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант 10-07-0171а и 13-07-00073а). Так же полученные результаты внедрены в учебный процесс в качестве заданий курсовой работы для студентов старших курсов в МГТУ им. Баумана.

**Апробация работы.** Работа апробирована на следующих

конференциях: международных молодежных научно-технических конференциях «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы», г. Москва, 2011-2013 г. г., Всероссийских школах-семинарах студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению "Наноинженерия", г. Калуга, 2009-2011 гг. В 2012 году присуждена стипендия Президента РФ. Также работа удостоена различных медалей и дипломов, в том числе медалью за лучшую научную работу XII конференции «Будущее машиностроения России» 2010 г. и дипломом первой степени III всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению "Наноинженерия" (2010 г.), 10-я международная конференция «Аналоговые полупроводниковые устройства и микросистемы 2014», Словакия, г.Смоленице.

**Публикации.** По материалам и основному содержанию диссертации опубликовано 7 печатных работ в трудах конференций и 3 статьи в журналах из списка ВАК, а так же публикация в сборнике трудов международной конференции, входящей в библиографическую базу данных SCOPUS.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения. Общий объем работы 105 страниц, содержит 57 рисунков, список использованных источников из 51 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность системного подхода к многомасштабному моделированию микрооптоэлектромеханических систем, сформулирована цель и задачи исследования и изложена структура диссертационной работы.

**Первая глава** диссертации посвящена обзору проблем и постановке проблемы моделирования и автоматизации системного проектирования МОЭМ систем, проблемам междисциплинарного моделирования микрооптоэлектромеханических систем, а также проблеме построения конечно-элементных моделей для механических подсистем с геометрическими размерами менее 500 мкм с учетом технологических погрешностей изготовления.

Проведен анализ проблем моделирования МОЭМ систем на примере микрооптоэлектромеханического акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо. Схематичное изображение рассматриваемого акселерометра представлено на рисунке 1. Интерферометр Фабри-Перо, закрепленный на подвижной массе (рис.1), представляет из себя две плоскопараллельные пластины (толщиной  $h_1$  и  $h_2$ ) с воздушным зазором, роль которого играет кварцевое стекло толщиной  $d$ , покрытые алюминием. Одна из пластин имеет толщину покрытия  $h_1$  порядка десятка нм. Для обеспечения прохождения не менее 75% падающего луча, другая пластина является зеркальной с толщиной покрытия  $h_2$  порядка сотен нм.

Показана необходимость разработки маршрута автоматизации системного проектирования МОЭМ систем. Проведен сравнительный анализ

достоинств и недостатков существующих подходов.

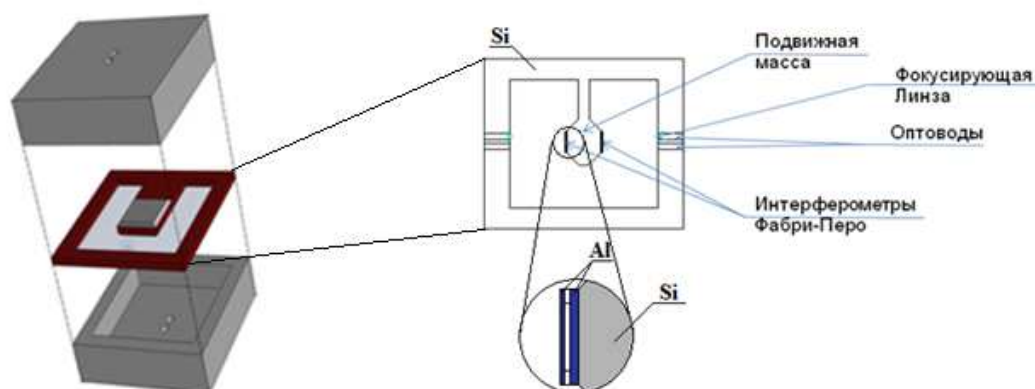


Рисунок 1 – Микрооптоэлектромеханический акселерометр на основе интерферометра Фабри-Перо и его конструкция

Так же в первой главе рассматривается проектирование механических подсистем для микрооптоэлектромеханических систем и для микрооптоэлектромеханических систем с распределенными параметрами. При проектировании МОЭМ систем, в частности при разработке математической модели механической подсистемы, возникает проблема невозможности получения в общем случае описания поведения на языке VHDL-AMS. Показано, что необходима разработка алгоритма адаптации конечно-элементной модели механической подсистемы с размерами менее 500 мкм. Проведен анализ динамических сетей Петри, приведены достоинства и недостатки.

Основной задачей является разработка маршрута автоматизации системного проектирования МОЭМС для получения его структуры. Поскольку в существующих средствах САПР невозможно провести совместное математическое моделирование механической, оптической и электронной подсистем МОЭМС.

**Во второй главе** предложены алгоритм многомасштабного моделирования МОЭМ систем и алгоритм адаптации конечно-элементной модели механической подсистемы, которые являются частью маршрута автоматизации системного проектирования микрооптоэлектромеханических систем.

На основе предложенного подхода исходная микрооптоэлектромеханическая система разделяется на оптическую, механическую и электронную подсистемы. На следующем этапе проводится отдельное моделирование данных подсистем и их конвертация всех моделей на язык формального описания VHDL-AMS. Далее проводится совместное моделирование оптической, механической и электронной подсистем. Для перехода между подсистемами различной физической природы используется описание подсистем на языке VHDL-AMS. Рассмотрено построение моделей оптических подсистем с использованием геометрических матриц, базирующееся на предположении, что угол между соседними лучами должен



стремиться к нулю. Предложенный подход проиллюстрирован на примере интерферометра Фабри-Перо. Показано, что необходимо рассмотреть следующие случаи прохождения светового пучка: фазовый переход воздушная среда/слой оксида алюминия толщиной  $h_1$ ; фазовый переход слой оксида алюминия/кварцевое стекло толщиной  $d$ ; отражение от второго слоя оксида алюминия толщиной  $h_2$ ; фазовый переход кварцевое стекло/слой оксида алюминия толщиной  $h_1$ ; фазовый переход слой оксида алюминия толщиной  $h_1$ /воздушная среда. Далее, формируется матричная модель, которая описывает поведение светового луча при прохождении сквозь интерферометр Фабри-Перо:

$$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ h_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} BE + A \frac{t_2}{n_2} & BF + AG \\ DE + C \frac{t_2}{n_2} & DF + CG \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ h \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где

$$A = \frac{(r_2 n_2 + t_2 (n_2 - n_1))(n_1 - n'_1)}{r_2 r_4 n_2} + \frac{1}{r_3} \left( \frac{(n_1 - n'_1)(r_3 + t_2) n_2 - t_2 n_1}{r_2 n_2} \right) + \frac{(t_2 n_3 + r_3 - t_2)(n_2 - n_1)}{r_2 r_4} + (n_3 - n_2)$$

$$B = \frac{r_2 n_2 + t_2 (n_2 - n_1)}{r_2 n_2} + A \frac{t_3}{n_3},$$

$$C = \frac{t_2}{n_2} \left( \frac{2(n_1 - n'_1)}{r_4} + \frac{n_3 - n_1}{r_3} \right),$$

$$D = \frac{t_2}{n_2 + n_3} C,$$

$$E = 1 + \frac{t_2 (n_2 - n_3)}{r_2 n_2},$$

$$F = \frac{n_1 - n_2}{r_1} + \frac{(n_2 - n_3)((n_1 - n_2)t_2 + r_1 n_2)}{r_1 r_2 n_2},$$

$$G = \frac{t_2}{n_2} + 1,$$

$n_i$ ,  $t_i$  и  $r_i$  соответственно коэффициент преломления, расстояние и радиус кривизны соответствующей поверхности.

На основе этой модели был разработан модуль в программном комплексе MATLAB/Simulink, позволяющий получить описание модели на языке VHDL-AMS для оптической подсистемы.

На основе законов Кирхгофа был разработан модуль в программном комплексе MATLAB/Simulink, позволяющий получить описание модели на языке VHDL-AMS для электронной подсистемы.

Для построения моделей механической подсистемы выбран метод

конечных элементов (КЭ). На рисунке 3 приведен разработанный алгоритм адаптации конечно-элементной модели механической подсистемы с размерами менее 500 мкм.

В основе данного алгоритма лежит возможность изменять размеры конечных элементов и плотность их расположения в зависимости от областей максимальной и минимальной деформации.

После построения конечно-элементной модели механической подсистемы МОЭМС следующим этапом является нахождение собственных частот механической подсистемы и построение макромоделей на

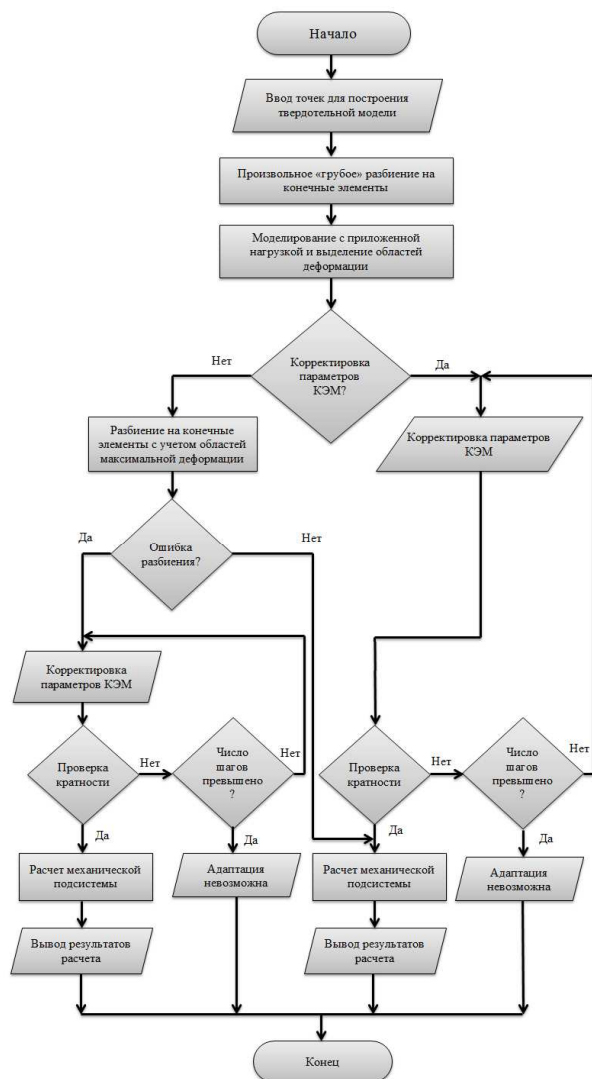


Рисунок 3 – Алгоритм адаптации конечно-элементной модели механической подсистемы МОЭМС системы

Основной особенностью разработанного модуля, является то, что для получения математической модели на языке VHDL-AMS пользователю достаточно ввести параметры создаваемой модели. В основе данного модуля лежит алгоритм (рис. 3), основанный на итеративном подборе размера конечного элемента, а также увеличении плотности сетки конечных элементов в области максимальной деформации. Основным этапом,

языке VHDL-AMS. Предложенный подход был реализован с использованием модуля ROMTool программного комплекса ANSYS. Данный пакет использует результаты моделирования механической подсистемы для построения макромоделей механической подсистемы как взвешенной суммы собственных векторов. Программный модуль для адаптации конечно-элементной модели был реализован на языке APDL. Применение разработанного модуля построения адаптивной конечно-элементной модели и последующего получения модели на языке VHDL-AMS позволяет сократить время, требуемое на построение конечно-элементной модели, проведение математического моделирования с приложенными нагрузками, получение описания поведения математической модели на языке VHDL-AMS.

позволяющим добиться адаптации, является этап эскизного моделирования механической подсистемы с последующим получением матрицы деформаций. Затем производится поиск областей максимальной и минимальной деформации. После получения списка узлов с наибольшими и наименьшими деформациями производится изменение размера конечного элемента в областях наибольшей деформации и последующее увеличение плотности КЭ. После построения адаптивной сетки КЭ проводятся основные этапы математического моделирования механической подсистемы с последующим получением описания поведения механической подсистемы на языке VHDL-AMS. Разработанный модуль позволяет получать описание математической модели на языке VHDL-AMS при нелинейном разбиении геометрической модели на конечные элементы, что сокращает время, затрачиваемое на проектирование и получение математической модели на языке VHDL-AMS.

На рисунке 4 представлена предложенная архитектура системы сопряжения программных комплексов ANSYS и MATLAB с использованием разработанных модулей.

Модуль взаимодействия программных комплексов ANSYS и MATLAB был реализован на языке C++ в операционной среде Windows.

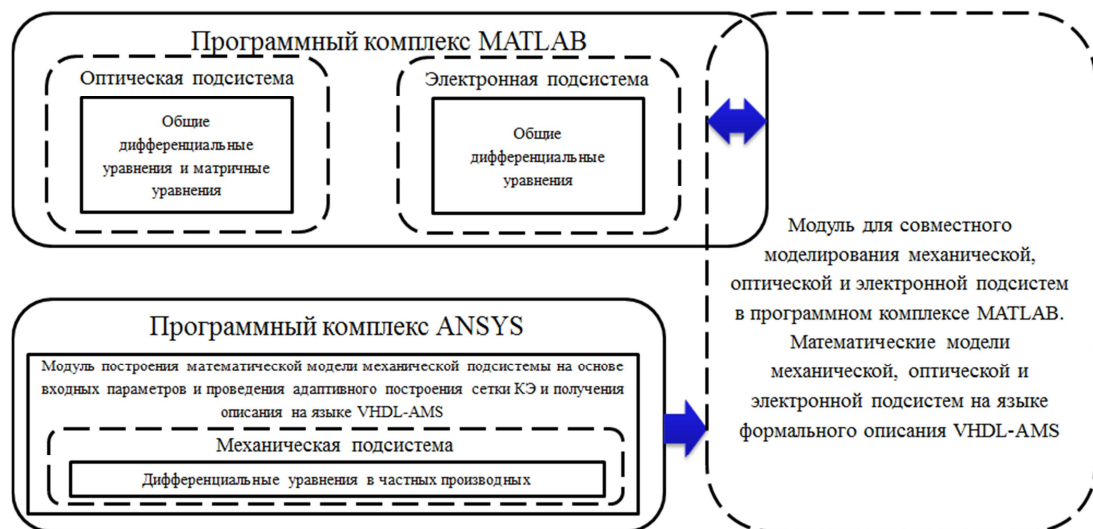


Рисунок 4 – Взаимодействие программных комплексов ANSYS и MATLAB с применением разработанных программных модулей

**В третьей главе** разработанные алгоритмы и программные модули применены для исследования влияния технологических погрешностей на характеристики механической подсистемы МОЭМ акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо.

На рисунке 5а приведена геометрическая модель подвижной массы механической подсистемы МОЭМ акселерометра с одиночной подвижной массой. На рисунках 5, б и в приведены конечно-элементные модели подвижной массы МОЭМ акселерометров с одиночной подвижной массой до применения разработанного программного модуля (рис. 5б) и после применения разработанного программного модуля (рис. 5в).

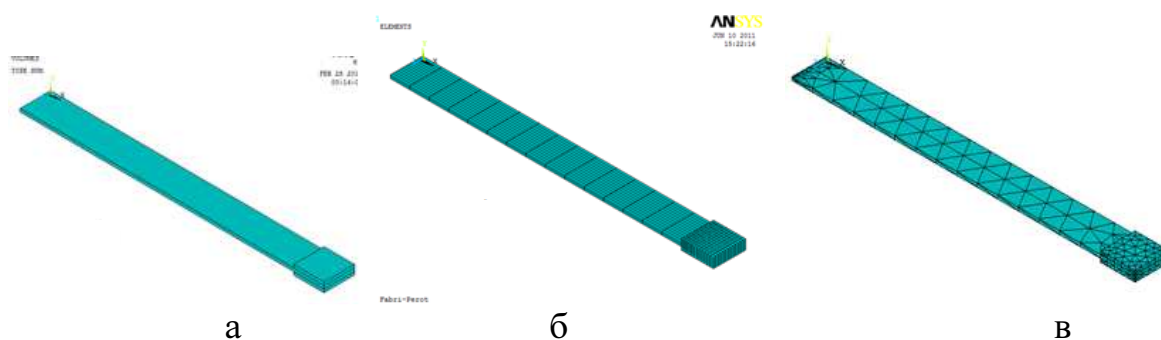


Рисунок 5 – Геометрическая модели подвижной массы механических подсистем МОЭМ акселерометров с одиночной подвижной массой (а) и конечно-элементные модели МОЭМ до (б) и после применения разработанного программного модуля адаптации конечно-элементной модели (в)

В таблице 1 приведены результаты экспериментальных исследований временных характеристик предложенного алгоритма на примере моделирования механической подсистемы МОЭМ акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо (рис. 3), а также проведено сравнение с исходным алгоритмом на различных вычислительных системах. Анализ табл. 1 позволяет сделать вывод, что для всех рассмотренных случаев время построения конечной модели с использованием предложенного алгоритма меньше времени построения конечно-элементной модели с использованием исходного алгоритма в среднем на 51, 4% для конфигурации Win7/8Gb DDR3/ Intel i7 и на 66% для конфигурации WinXP/1Gb DDR2/Core2Duo.

Таблица 1 – Количество элементов и узлов конечно-элементной модели

Кол-во элементов	Кол-во узлов	Исходный алгоритм		Предложенный алгоритм	
		Время построения сетки КЭ <sup>1</sup> , с	Время построения сетки КЭ <sup>2</sup> , с	Время построения сетки КЭ <sup>1</sup> , с	Время построения сетки КЭ <sup>2</sup> , с
4252	7648	0.036	0.93	0.029	0.76
6161	10821	0.051	1.47	0.041	1.19
7865	13813	0.075	2.09	0.059	1.65
12568	22074	0.152	3.47	0.117	2.67
24693	43370	0.524	6.79	0.393	5.09
66987	117654	1.34	18.62	0.97	13.59

<sup>1</sup>-Конфигурация системы Win7/8Gb DDR3/ Intel i7

<sup>2</sup>-Конфигурация системы WinXP/1Gb DDR2/Core2Duo

Одним из важнейших факторов, влияющих на выходные характеристики МОЭМ системы, является точность изготовления подвижной массы. На этапах травления подложки для получения необходимой конфигурации слоя возможно возникновение различных дефектов. В работе с использованием предложенных подходов выполнено моделирование механической подсистемы и МОЭМ устройства с учетом технологических дефектов.

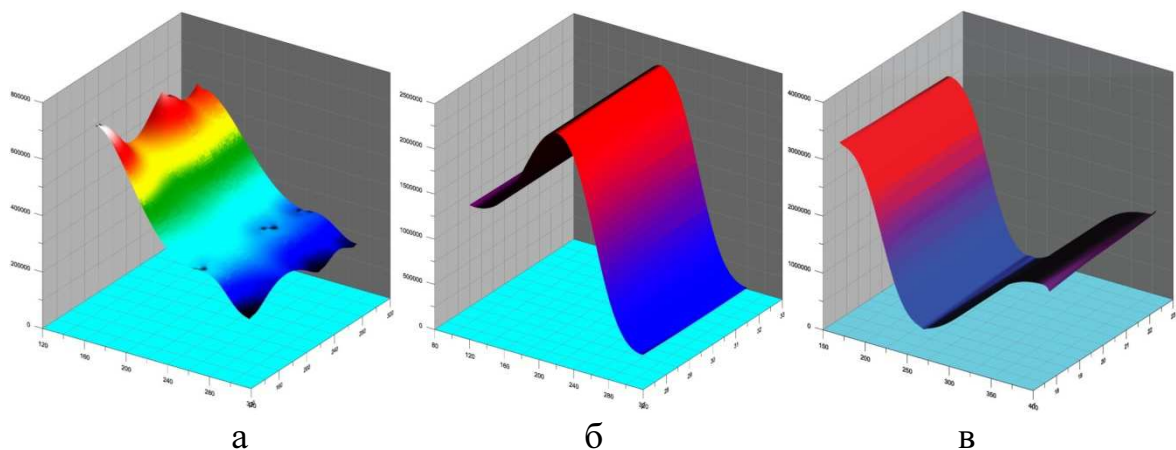


Рис. 6 – Влияние технологических погрешностей длины (а), ширины (б) и толщины (в) на собственные частоты механической подсистемы МОЭМ акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо при различных длинах подвижной массы

На рисунке 6 приведены результаты экспериментальных исследований влияния технологических погрешностей длины (рис. 6а), ширины (рис. 6б) и толщины (рис. 6в) на собственные частоты механической подсистемы МОЭМ акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо для различных длин подвижной части от 120 мкм до 300 мкм.

На рис. 7 представлены результаты экспериментальных исследований влияния технологических погрешностей длины (а), ширины (б) и толщины (в) на время отклика МОЭМ акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо, полученные с применением разработанных моделей на языке VHDL-AMS.

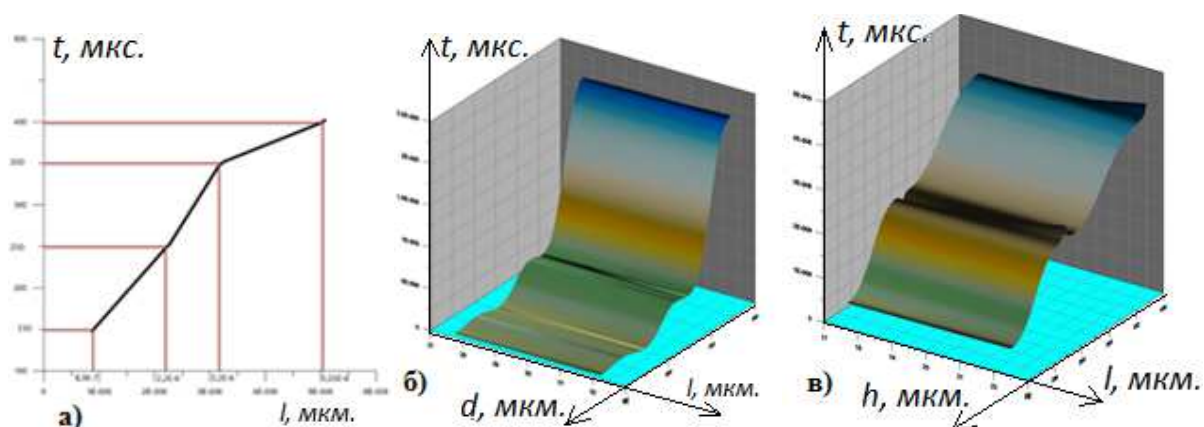


Рисунок 7 – Влияние технологической погрешности длины (а), ширины (б) и толщины (в) на время отклика МОЭМ акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо

На основе результатов исследования, были сформулированы следующие эвристические приемы, которые могут быть использованы для концептуального проектирования МОЭМ систем:

1. С увеличением длины подвижной массы механической подсистемы

происходит уменьшение собственных частот.

2. Технологический дрейф ширины и толщины подвижной массы оказывают влияние на собственные частоты механической подсистемы, в среднем около 8,5%.

3. С увеличением длины подвижной массы до 350 мкм время отклика системы в среднем увеличивается линейно, затем наблюдается режим насыщения.

4. При длине свыше 350 мкм технологический дрейф ширины и толщины подвижной массы механической подсистемы приводит к увеличению времени отклика всей системы.

Проведенные экспериментальные исследования влияния технологического дрейфа параметров механической подсистемы МОЭМ акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо на собственные частоты механической подсистемы и на время отклика всей системы в целом, а так же проведенные экспериментальные исследования изменения времени построения конечно-элементной модели с применением разработанного модуля для программного комплекса ANSYS на двух вычислительных системах с различными характеристиками показали существенное снижение времени, затрачиваемого на этапе проектирования на механическую подсистему и исследование влияния технологических дефектов на выходные характеристики устройства в целом.

**В четвертой главе** разработанные алгоритмы и программные модули применены для исследования влияния технологических погрешностей при проектировании распределенных МОЭМ систем.

На рисунке 8а приведена геометрическая модель механической подсистемы распределенного МОЭМ акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо. На рисунках 8, б и в приведены конечно-элементные модели механической подсистемы распределенного МОЭМ акселерометра до применения разработанного программного модуля (рис. 8б) и после применения разработанного программного модуля (рис. 8в).

В работе с использованием предложенных подходов выполнено моделирование механической подсистемы и распределенного МОЭМ акселерометра с учетом технологических дефектов.

На рисунках 9, 10 приведены результаты экспериментальных исследований распределенного МОЭМ акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо. Показано влияние технологической погрешности на собственные частоты механической подсистемы (рис. 9) и время отклика всей системы в целом (рис. 10).

Установлены зависимости выходных характеристик разрабатываемого устройства от технологических дефектов механической подсистемы при помощи разработанного маршрута автоматизации системного проектирования микрооптоэлектромеханических систем на примере МОЭМ акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо.

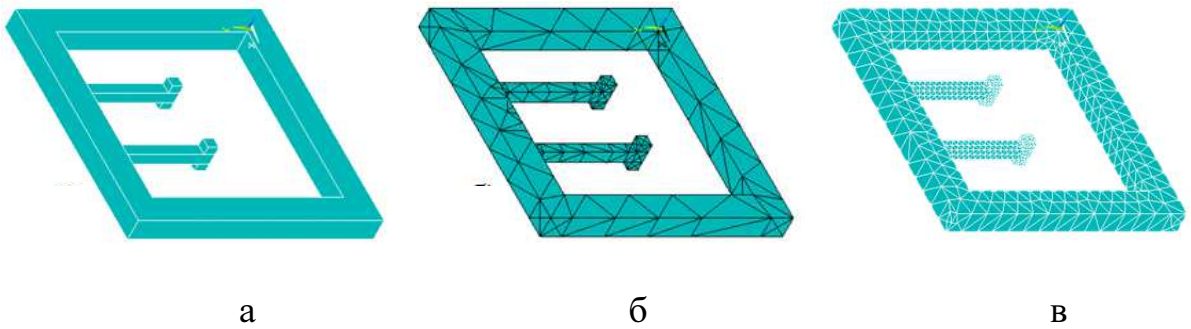


Рисунок 8 – Геометрическая модель механической подсистемы распределенного МОЭМ акселерометра (а) и конечно-элементные модели до (б) и после применения разработанного программного модуля адаптации конечно-элементной модели (в)

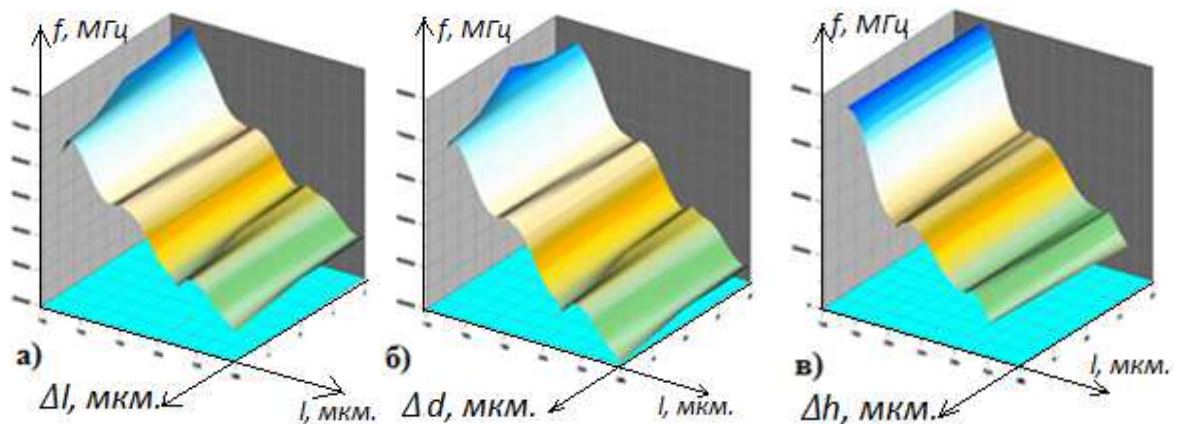


Рисунок 9 – Влияние технологического разброса длины (а), ширины (б) и толщины (в) подвижной массы при различных длинах подвижной массы для первой подвижной массы распределенного МОЭМ акселерометра на собственные частоты

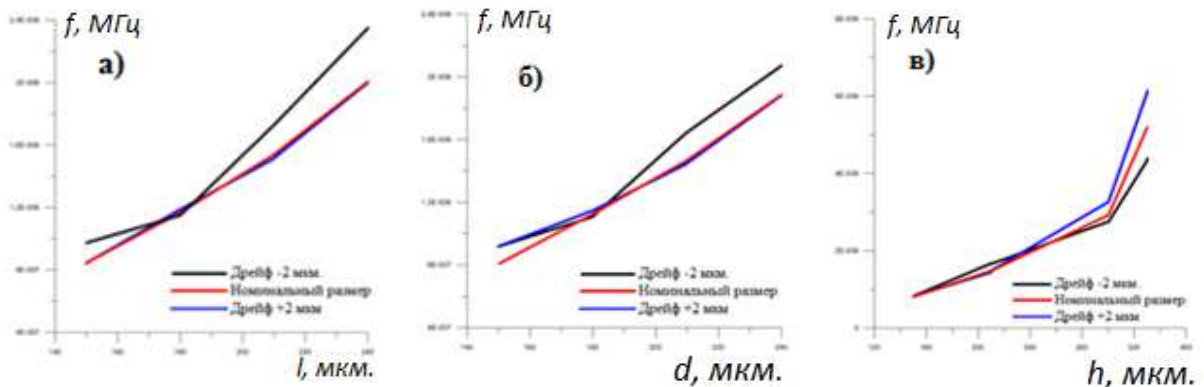


Рисунок 10 – Изменение времени отклика распределенного МОЭМ акселерометра при изменении технологического разброса длины(а), ширины(б) и толщины(в) подвижной массы для первой подвижной массы распределенного МОЭМ акселерометра

На основе результатов исследования, были сформулированы следующие эвристические приемы, которые могут быть использованы для концептуального проектирования МОЭМ систем:

1. С увеличением длины подвижной массы механической подсистемы происходит уменьшение собственных частот.

2. Технологический дрейф длины и ширины подвижной массы оказывают влияние на собственные частоты механической подсистемы.

3. С увеличением длины подвижной массы время отклика системы в среднем увеличивается.

**В разделе «выводы и заключение»** представлены основные результаты работы.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Разработан маршрут автоматизации системного проектирования микрооптоэлектромеханических систем на основе разработанных алгоритмов.

2. Разработан алгоритм адаптации конечно-элементной модели модели механической подсистемы с размерами менее 500 мкм, позволяющий сократить время на получение структуры МОЭМС.

3. Разработана математическая модель оптической подсистемы на основе матричного подхода и программный модуль, реализующий этот подход.

4. Разработана модуль сопряжения программного комплекса ANSYS и программного комплекса Matlab на основе использования языка формального описания VHDL-AMS.

5. Проведено математическое моделирование механической подсистемы МОЭМ акселерометра и установлена зависимость выходных характеристик устройства от технологических дефектов механической подсистемы.

6. Сформулированы эвристические приемы, позволяющие учесть влияние точности воспроизведения механической подсистемы на собственные частоты механической подсистемы и на время отклика всей системы при проектировании МОЭМ систем, которые могут быть использованы при концептуальном проектировании МОЭМ систем.

### **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

1. Шахнов В.А., Зинченко Л.А., Косолапов И.А. Особенности многомасштабного моделирования микрооптоэлектромеханических систем с учетом технологических погрешностей// Датчики и системы. №9. 2013. С.29-34.

2. Зинченко Л.А., Косолапов И.А. Методы моделирования микрооптоэлектромеханических подсистем// Наука и образование: электронное научно-техническое издание «Наука и образование». №11, 2011 г.

3. Кальнов В.А., Косолапов И.А. Методы повышения выхода годных при производстве микромеханических инерциальных датчиков// «Наноинженерия»: №2. 2011. С.23-26.

4. Косолапов И.А. Моделирование микроакселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо в САПР ANSYS// НАНОИНЖЕНЕРИЯ-2009: Сборник трудов второй Всероссийской Школы-семинара студентов,



аспирантов и молодых ученых по направлению «НАНОИНЖЕНЕРИЯ». Калуга, 2009. С.108-111.

5. Косолапов И.А., Кишиневский А.Г., Паршина А.А., Многомасштабное моделирование на основе иерархического подхода на примере микрооптоэлектромеханического акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо// НАНОИНЖЕНЕРИЯ-2010: Сборник трудов третьей Всероссийской Школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «НАНОИНЖЕНЕРИЯ». Калуга, 2010. С.273-276.

6. Косолапов И.А. Иерархическое многомасштабное моделирование микрооптомеханических систем// Научно-технические системы и интеллектуальные системы 2010: Сборник трудов 12-ой Международной молодежной научно-технической конференции. М., 2010. С.187-191.

7. Косолапов И.А. Разработка программного обеспечения для многомасштабного иерархического моделирования микрооптоэлектромеханических систем// НАНОИНЖЕНЕРИЯ-2011: Сборник трудов четвертой Всероссийской Школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «НАНОИНЖЕНЕРИЯ». Калуга, 2011. С.165-168.

8. Косолапов И.А. Междисциплинарные связи в многомасштабном моделировании микрооптоэлектромеханических систем// Научно-технические системы и интеллектуальные системы 2011: Сборник трудов 13-ой Международной молодежной научно-технической конференции. М., 2011. С.205-209.

9. Косолапов И.А. Алгоритмы адаптации многомасштабного иерархического моделирования микрооптоэлектромеханических систем// Научно-технические системы и интеллектуальные системы 2012: Сборник трудов 14-ой Международной молодежной научно-технической конференции. М., 2012. С.176-179.

10. Косолапов И.А. Разработка модуля адаптации метода многомасштабного иерархического моделирования микрооптоэлектромеханических систем// Научно-технические системы и интеллектуальные системы 2013: Сборник трудов 15-ой Международной молодежной научно-технической конференции. М., 2013 г. С.410-413.

11. Зинченко Л.А., Косолапов И.А., Математическое моделирование распределенных МОЭМС для «умных» сред// IEEE, ASDAM 2014, Словакия, Смоленице, 2014. С.206-210.