

ОСОБЕННОСТИ МНОГОМАСШТАБНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МИКРООПТОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ¹

Л. А. Зинченко, И. А. Косолапов, В. А. Шахнов

Рассмотрены особенности многомасштабного иерархического моделирования микрооптоэлектромеханических систем. Приведена методика расчета и алгоритм моделирования. Рассмотрено влияние технологических погрешностей на конечные характеристики микрооптоэлектромеханических систем. Предложены подходы, проиллюстрированные на примере микрооптоэлектромеханического акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо.

Ключевые слова: микрооптоэлектромеханические системы, многомасштабное моделирование, математическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня микроэлектроника достигает пределов своего развития. Это обусловлено переходом в область глубокого субмикрона, где все большее влияние оказывают квантово-механические эффекты. Другими немаловажными факторами являются такие характеристики системы, как быстродействие или отклик системы, а также чувствительность устройства [1]. Одним из возможных путей решения проблемы является разработка принципиально новых устройств, основанных на комбинации физических эффектов различной природы.

К таким устройствам относятся микроэлектромеханические системы, базирующиеся на сочетании механических и электрических эффектов. В сочетании с оптическими эффектами, такими как интерференция и др., появляется возможность создания принципиально новых устройств, сочетающих в себе преимущества оптических, механических и электрических эффектов.

При разработке новых устройств в нанотехнологии активно применяется математическое моделирование различных объектов вплоть до создания экспериментального образца [1]. Это позволяет сократить затраты на исследование и уменьшить время, необходимое на разработку и экспериментальное исследование устройства.

Микрооптоэлектромеханические системы (МОЭМС) — принципиально новые устройства, сочетающие в себе оптические эффекты интерференции света, механические эффекты деформации и преобразование электрических импульсов в цифровой код с последующей обработкой и предоставлением в понятном виде пользователю. Микрооптоэлектромеханические системы имеют лучшие характеристики в сравнении с классическими микроэлектромеханическими системами, поскольку не подвержены воздействию электромагнитного излучения и старению [1–3].

МОЭМС применяются в различных областях промышленности и производства: от использования в качестве датчиков давления в агрессивных средах до установки в возимую аппаратуру и применения в авиацион-

ной и автомобильной промышленности.

Поскольку моделирование МОЭМС — нетривиальная задача, а решение дифференциальных уравнений второго порядка является ресурсоемкой задачей, то возникает потребность в разработке алгоритма адаптации методов моделирования. В данной статье предложен оригинальный алгоритм адаптации методов многомасштабного иерархического моделирования МОЭМС с применением языка формального описания смешанных цифроаналоговых устройств VHDL-AMS и языка APDL с последующей реализацией алгоритма в качестве программного модуля [4, 5].

Данный алгоритм позволяет предварительно оценивать степень деформации структуры в результате воздействия нагрузки, выделять области с меньшими и большими деформациями, проводить последующее перестроение сетки конечных элементов модели с учетом данных областей и затем проводить расчет модели с сеткой конечных элементов, построенной с учетом областей наибольшей деформации и экспортировать данную модель, описанную на языке VHDL-AMS.

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-07-0171а и 13-07-00073а.

ИЕРАРХИЧЕСКОЕ МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЭМС

Существующие в настоящее время продукты, позволяющие проводить моделирование микрооптоэлектромеханической системы в одном программном комплексе являются зачастую узкоспециализированными и оптимизированны для решения одной конкретной задачи моделирования.

В основе иерархического моделирования лежит представление о разрабатываемом устройстве как иерархической структуры, починающейся правилами иерархии:

- вертикальная декомпозиция: строго вертикальное расположение и подчинение подсистем;
- вмешательство: подсистема верхнего уровня может вмешиваться в работу подсистем нижнего уровня;

— зависимость: правильность работы подсистемы верхнего уровня полностью зависит от правильности выполнения своих функций подсистемами нижнего уровня.

Исходя из этих правил проводится разбиение МОЭМС на три подсистемы — оптическую, механическую и электронную (управляющую).

Проблема моделирования МОЭМС является междисциплинарной. Основная проблема подобного моделирования состоит в отсутствии четкого алгоритма для моделирования всей системы в целом, поскольку раздельное моделирование отдельных подсистем не может показать полноценного поведения устройства во время совместной работы подсистем. На рис. 1 приведен пример микрооптоэлектромеханической системы, в которой каждая часть устройства сочетает в себе оптические, механические и электронные подсистемы. Решая основные проблемы совместного моделирования оптической, механической и электронной подсистем для одного такого устройства, решается проблема моделирования для всей системы в целом [6, 7].

На рис. 2 представлен маршрут многомасштабного иерархического моделирования микрооптоэлектромеханической системы на примере микрооптоэлектромеханического акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо [2, 5, 6].

Если для моделирования подсистем различной физической природы может использоваться разное программное обеспечение, то для совместного моделирования применяется программный комплекс MATLAB, куда передаются модели, описанные на языке VHDL-AMS [6, 7].

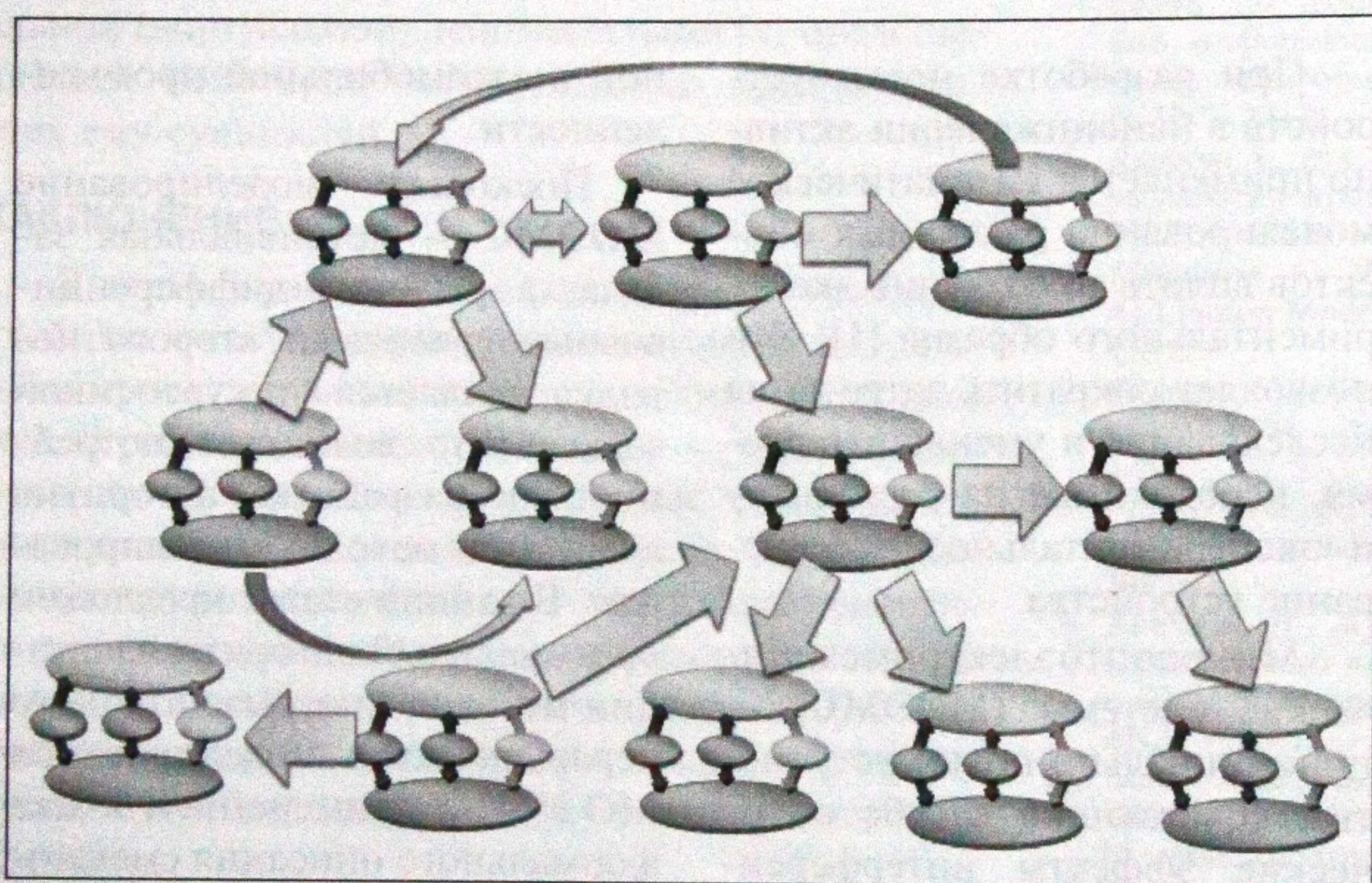


Рис. 1. Сложная микрооптоэлектромеханическая система

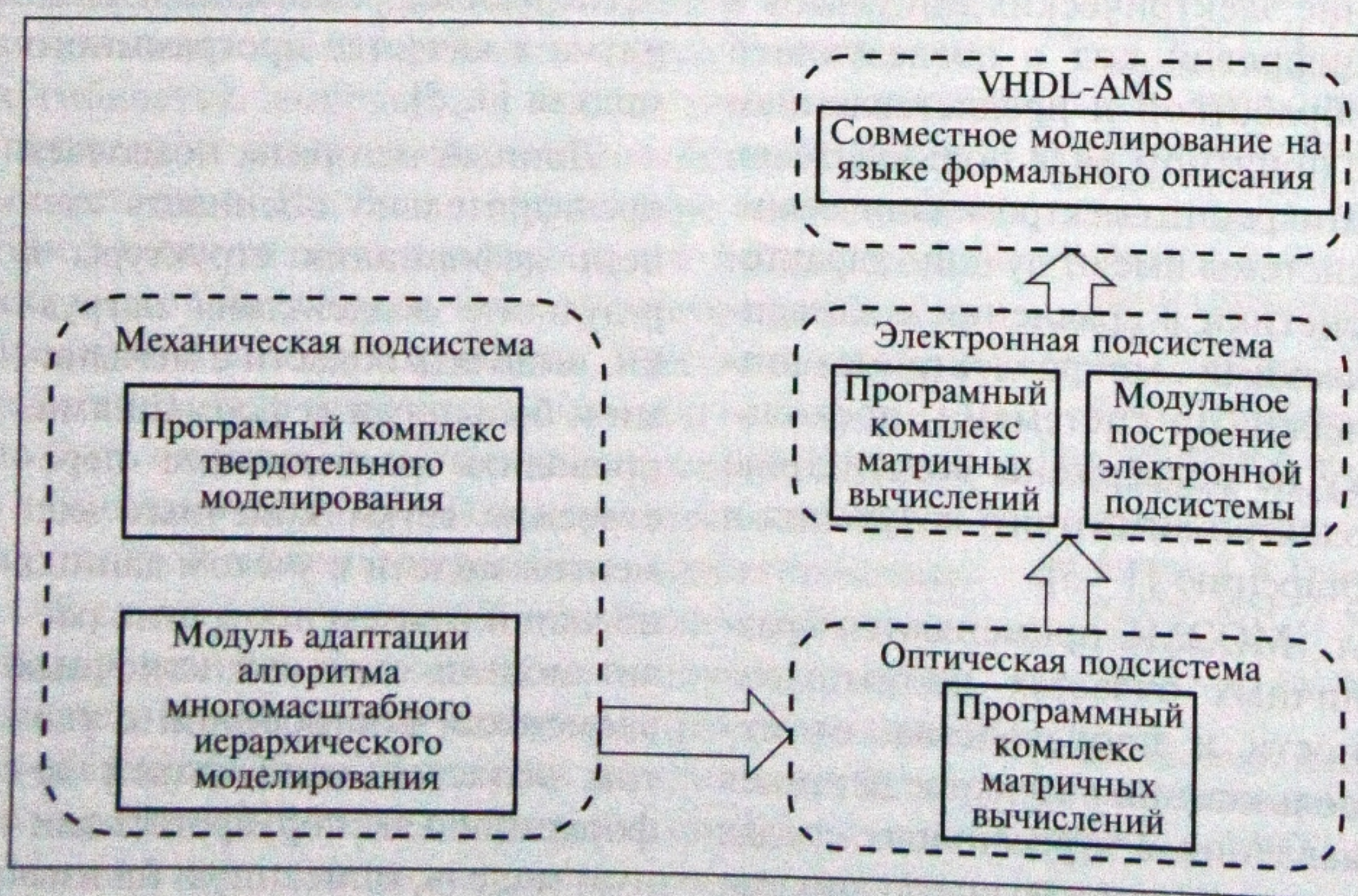


Рис. 2. Маршрут моделирования микрооптоэлектромеханической системы

В случае, когда разрабатываемая система является распределенной, необходимо учитывать взаимное влияние подсистем.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ПОДСИСТЕМ

Основой МОЭМС является механическая подсистема, обеспечивающая изменение положения интерферометра Фабри-Перо [1, 2]. Оптическая подсистема служит для измерения изменения параметра, а электронная обеспечивает интерпретацию полученных оптических сигналов, а также обеспечивает точность измерений [3].

При моделировании оптических систем, таких как интерферометры, необходимо использовать формулы и правила геометрической оптики. Сложные оптические эффекты можно представить в виде набора простых оптических эффектов. Простой оптический эффект описывается матричным выражением, а описание сложных оптических эффектов синтезируется на основе матричных выражений, т. е. как произведение матричных выражений простых оптических эффектов.

Моделирование оптических систем с использованием геометрических матриц основано на том, что угол между соседними лучами должен стремиться к нулю. Иными словами, проходящие лучи света должны быть параллельны оптической оси [3, 8, 11].

Далее, после того как на оптическую систему подан световой пучок, необходимо провести моделирование механической подсистемы, для того чтобы получить отклонение подвижной массы от состояния покоя и

получить угол отклонения, который влияет на интерференционную картину, получаемую от оптической системы.

Для моделирования механической подсистемы выбран метод конечных элементов.

Метод конечных элементов (МКЭ) — численный метод решения задач прикладной физики [5, 6], который широко применяется для решения задач механики деформируемого твердого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики.

К основным преимуществам МКЭ относят доступность и простоту его понимания, а также его применимость для задач с произвольной формой области решения, возможность создания на основе метода высококачественных универсальных программ для ЭВМ [5, 10, 11].

Основная идея метода конечных элементов состоит в том, что любую непрерывную величину, такую, как перемещение, температура, давление и др., можно аппроксимировать моделью, состоящей из отдельных элементов. На каждом из этих элементов исследуемая непрерывная величина аппроксимируется кусочно-непрерывной функцией, которая строится на значениях исследуемой непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемого элемента.

В общем случае непрерывная величина заранее неизвестна, и нужно определить значения этой величины в некоторых внутренних точках области. Дискретную модель, однако, очень легко построить, если сначала предположить, что известны числовые значения этой величины в некоторых внутренних точках области (далее “узлы”). После этого можно перейти к общему случаю.

Чаще всего при построении дискретной модели непрерывной величины поступают следующим образом.

1. Область определения непрерывной величины разбивается на конечное число подобластей, называемых элементами. Эти элементы имеют общие узловые точки и в совокупности аппроксимируют форму области.

2. В рассматриваемой области фиксируется конечное число точек. Эти точки называются узловыми точками или просто узлами.

3. Значение непрерывной величины в каждой узловой точке первоначально считается известным, однако необходимо помнить, что эти значения в действительности еще предстоит определить путем наложения на них дополнительных ограничений в зависимости от физической сущности задачи.

4. Используя значения исследуемой непрерывной величины в узловых точках и ту или иную аппроксимирующую функцию, определяют значение исследуемой величины внутри области [2, 5, 6, 9].

ИЕРАРХИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МИКРООПТОЭЛЕКТРОМЕХА- НИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО

Поскольку сложная система разбита на механическую, оптическую и электронную подсистемы, то следует выявить взаимное влияние данных подсистем друг на друга.

Для преодоления проблем междисциплинарного моделирования МОЭМС было предложено использовать иерархический подход, схематично показанный на рис. 3 [10, 11].

СОЗДАНИЕ МАКРОМОДЕЛИ НА ЯЗЫКЕ ФОРМАЛЬНОГО ОПИСАНИЯ VHDL-AMS

Для моделирования механических подсистем методом конечных элементов выбран программный комплекс ANSYS. Затем при помощи модуля ROMTool проводится создание макромодели на языке формального описания VHDL-AMS для последующего совместного моделирования на языке VHDL-AMS [5, 8].

Модели электронной подсистемы акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо строятся на основе законов Кирхгофа [9, 12, 13].

Моделирование оптической системы проводится с использованием матричных выражений в программном комплексе MATLAB, а моделирование электронной подсистемы, основанной на законах Кирхгофа, — в дополнении Simulink. В данном дополнении проводится построение математической модели электронной подсистемы на основе элементарных блоков с заданными функциями.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИРОВАННОГО АЛГОРИТМА МНОГОМАСШТАБНОГО ИЕРАРХИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ МОЭМС НА ПРИМЕРЕ МИКРООПТОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО

Конечно-элементная модель механической подсистемы создается в программном комплексе ANSYS с последующим представлением на языке формального описания VHDL-AMS. Модель оптической подсистемы

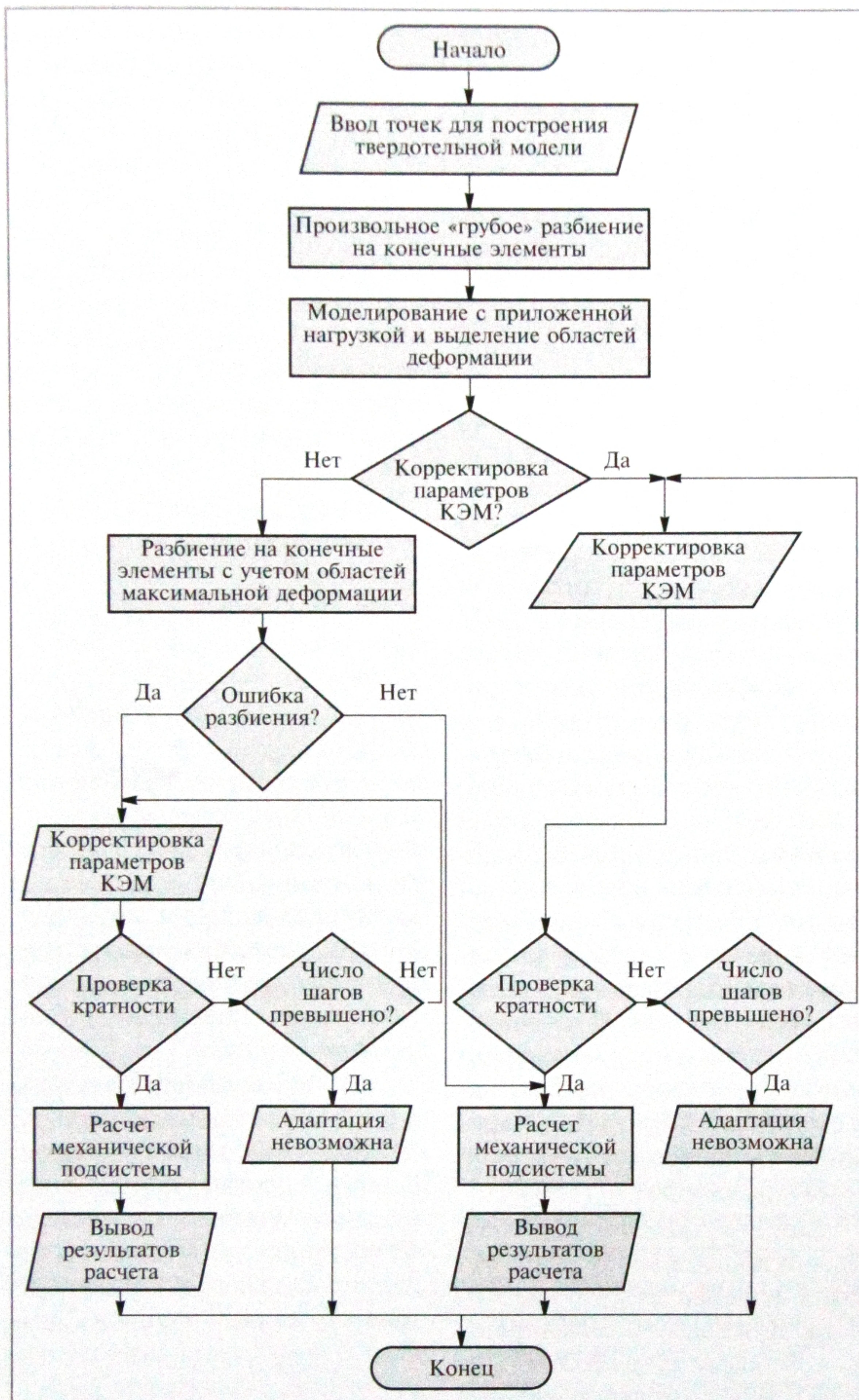


Рис. 4. Адаптированный алгоритм моделирования механической подсистемы микрооптоэлектромеханического акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо с учетом технологических погрешностей

ся расположение резонансных, или так называемых собственных частот за пределами частот вибраций, которым устройства могут подвергнуться в реальных условиях.

При изменении линейных размеров устройства меняются такие выходные характеристики, как частота собственных колебаний, чувствительность подвижного элемента и др.

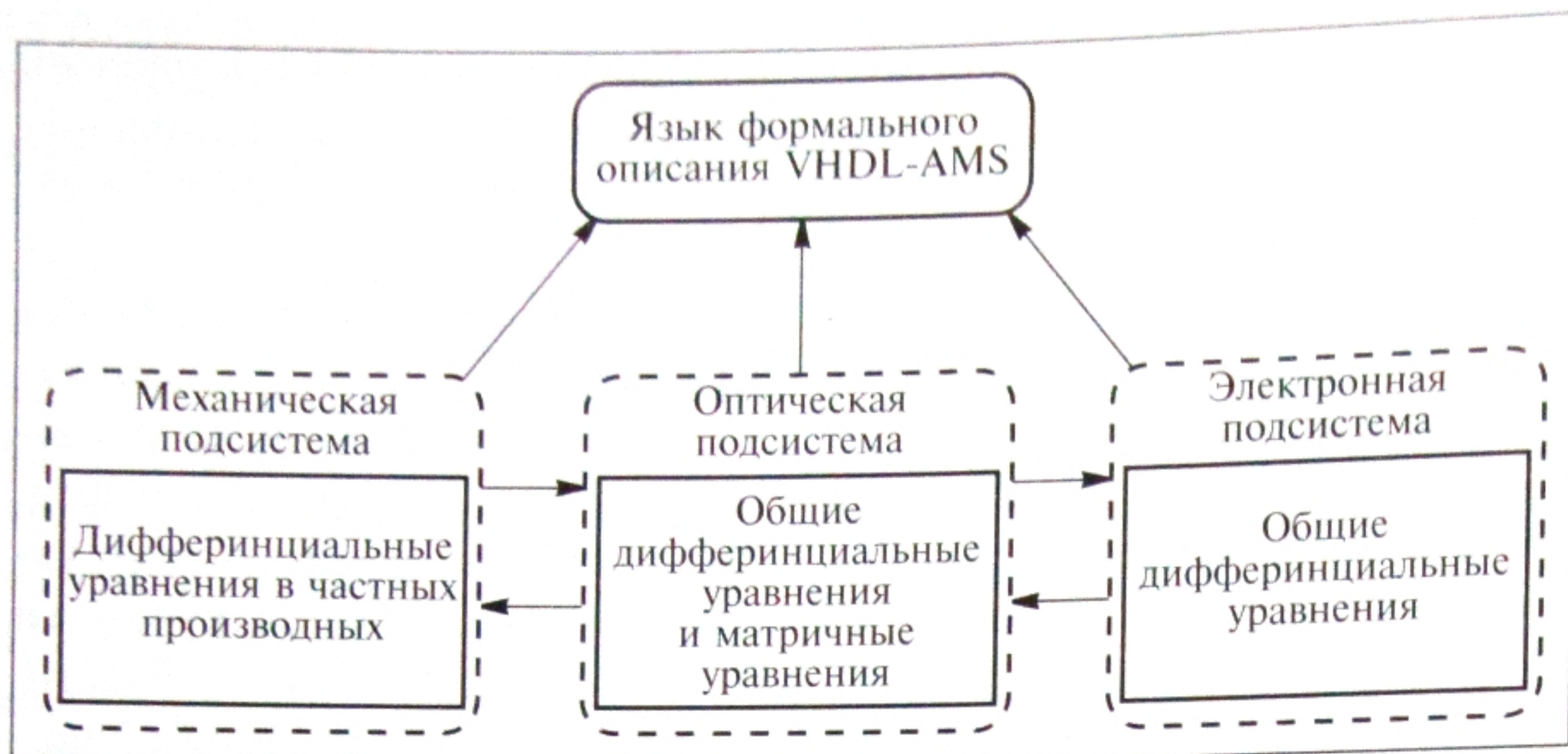


Рис. 3. Методы перехода между оптической, механической и управляющей подсистемами

На первом шаге выделяются оптическая, механическая и электронные подсистемы. В пределах каждой подсистемы выделяются подсистемы более низкого уровня. Затем каждая из подсистем низкого уровня моделируется сначала отдельно, затем совмещенно с подсистемами более высокого уровня, пока не будет получена математическая модель механической, оптической и электронной подсистем на основе совместного моделирования подсистем более низкого уровня каждой из подсистем.

Возможность перехода между механической, оптической и электронной подсистемами основана на раздельном создании математических моделей подсистем с последующим совместным моделированием на языке VHDL-AMS [5, 6].

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЭМС С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Микрооптоэлектромеханический акселерометр на основе интерферометра Фабри-Перо может применяться в различных областях промышленности. Поскольку микроакселерометр подвержен постоянным нагрузкам, вибрациям, возникающим в про-

цессе движения, то собственные частоты являются критическими параметрами устройства, которые влияют на работоспособность устройства.

На рис. 4 приведен предложенный алгоритм многомасштабного иерархического моделирования микрооптоэлектромеханического акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо. Исходная микрооптоэлектромеханическая система разделяется на оптическую, механическую и электронную подсистемы. На следующем этапе проводится раздельное моделирование данных подсистем и их конвертация на язык формального описания VHDL-AMS. Далее проводится совместное моделирование оптической, механической и электронной подсистем [5, 6].

Для перехода между подсистемами различной физической природы используется описание подсистем на языке VHDL-AMS. Механическая подсистема конвертируется на язык формального описания VHDL-AMS при помощи пакета ROMTool программного комплекса ANSYS. Данный пакет использует результаты моделирования механической подсистемы для построения макромоделей механичес-

кой подсистемы как взвешенной суммы собственных векторов. Для генерации моделей оптической и электронной подсистем на языке VHDL-AMS используются утилиты программного комплекса MATLAB/Simulink.

В качестве расчетного средства для проведения анализа динамического поведения конструкции, т. е. определения ее фундаментальных форм и частот колебаний, применяется модальный анализ.

Результаты анализа дают возможность установить число форм колебаний и шаг интегрирования по времени, что может обеспечить надежное решение задачи о динамическом поведении системы в неустановившемся режиме.

Кроме того, некоторые методы получения решения для переходных процессов нуждаются в результатах модального анализа. С помощью программы ANSYS модальный анализ можно выполнять как для ненагруженной конструкции, так и вслед за нелинейным расчетом с учетом больших смещений [5, 6].

Основными факторами, влияющими на изменение линейных размеров являются:

- время травления поверхности кремниевой пластины;
- концентрация кислоты в растворе травления;
- метод травления.

Все эти факторы существенно влияют на линейные размеры устройства.

При иерархическом многомасштабном моделировании важную роль играет баланс между низкой погрешностью расчета собственных частот и малой ресурсоемкостью.

Одним из важнейших условий при производстве устройств для возимой аппаратуры является

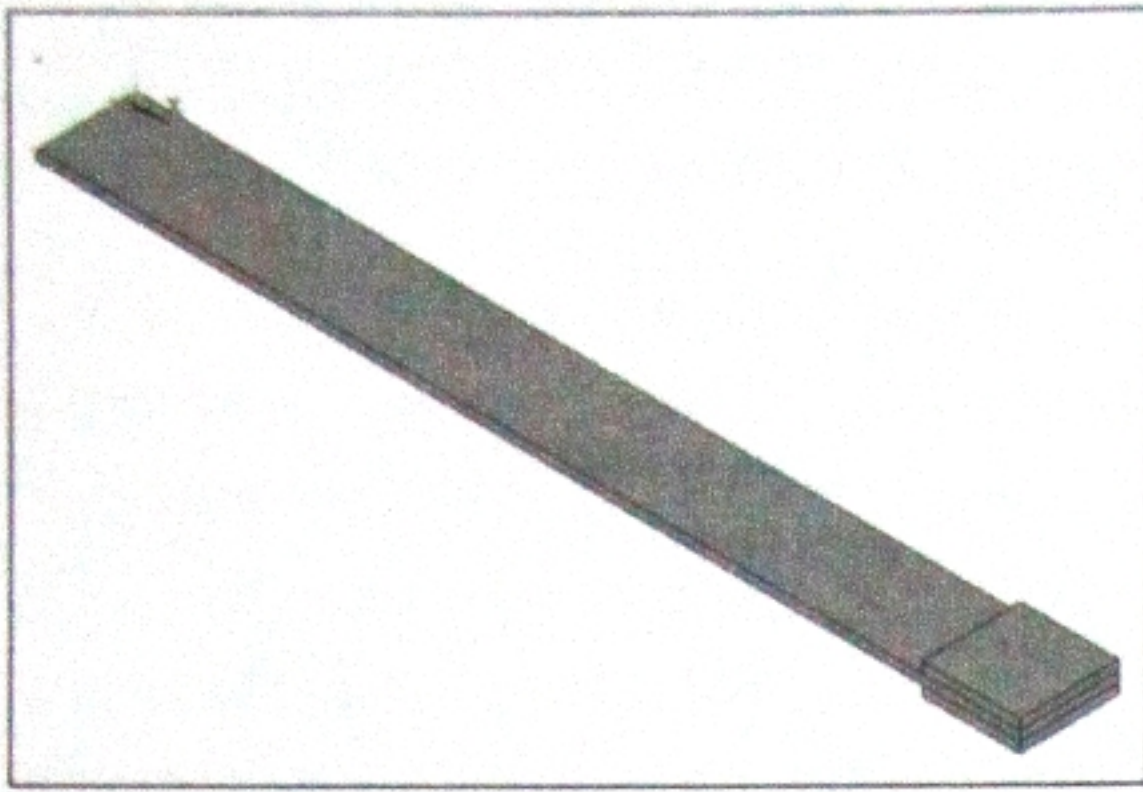


Рис. 5. Геометрическая модель подвижной массы механической подсистемы

мы представлена в виде матричных уравнений, на базе которых создан модуль расчета параметров интерферометра Фабри-Перо в программном комплексе MATLAB, в котором затем осуществляется конвертация модели на язык VHDL-AMS. Электронная подсистема моделируется в программном пакете MATLAB/Simulink, являющимся интегрированным дополнением среды MATLAB, и затем полученная модель конвертируется на язык VHDL-AMS [7, 8].

Математическая модель механической подсистемы представляет собой подвижную массу, на которой расположены два интерферометра Фабри-Перо [8].

На рис. 5 приведена исходная математическая модель, разбитая на конечные элементы. Размеры конечных элементов выбираются автоматически программным комплексом ANSYS исходя из линейных размеров математической модели и предварительно рассчитанных мест максимальной деформации (точки ограничения степеней свободы и точки приложения нагрузки). Данное разбиение дает точный расчет механических деформаций при приложении нагрузки, но последующая конвертация на язык VHDL-AMS невозможна из-за недостаточности описания поведения области между точками ограничения степеней

свободы и точками приложения нагрузки.

Для получения модели на языке VHDL-AMS необходимо провести разбиение математической модели с учетом ее линейных размеров, распределяя плотность конечных элементов более равномерно [5, 6, 9].

При изменении размеров конечных элементов было выявлено существенный недостаток алгоритма — математические модели с определенными линейными размерами невозможно разбить на конечные элементы с заданными размерами и плотностью разбиения. Здесь следует ввести такой параметр как *укладываемость* (или *кратность*) размеров математической модели в размеры конечных элементов по трем осям координат. В связи с этим и возникает необходимость проведения адаптации размеров конечных элементов к каждой математической модели. В целом — это задача подбора параметров сетки конечных элементов. В основе решения данной задачи лежит метод пошагового подбора параметров с быстрым моделированием и оценкой возможности моделирования.

После создания какого-либо нового проекта необходимо выбрать конечно-элементные модели. Для данного моделирования выбраны модели SOLID45 и SOLID122, предназначенные для электростатики.

Элемент модели имеет свойства пластичности, ползучести, радиационного набухания, изменения жесткости при приложении нагрузок, больших перемещений и больших деформаций. Для контроля скручивания элемента имеется опция интегрирования пониженного порядка [5, 6].

Следующим шагом является разбиение созданной модели на конечные элементы (КЭ). В программном пакете ANSYS существует два варианта разбиения — тетраэдрическое и гексагональное. Тетраэдрическое разбиение применимо лишь для определенного круга моделей, поскольку не все объемы возможно разбить на одинаковое число тетраэдров. В данном случае применено тетраэдрическое трехмерное разбиение.

Число элементов и узлов в значительной степени влияют на точность расчетов конечно-элементной модели, а также на длительность расчетов. В табл. 1 приведено число КЭ и узлов при различных построениях сетки КЭ.

Для выбора числа элементов и числа узлов конечно-элементной модели необходимо провести исследования, результатами которых будет время, затрачиваемое на обработку и расчет конечно-элементной модели, состоящей из числа элементов, указанных в табл. 2.

Из приведенной таблицы видно, что подходящими по длительности обработки и разбиения являются КЭ модели с числом элементов от 6000 до 12 000, поскольку в этом случае для расчетов могут применяться вычислительные машины с низ-

Таблица 1

Число элементов и узлов конечно-элементной модели

Число элементов	Число узлов
2700	4742
4252	7648
6161	10821
7865	13813
12568	22074
24693	43370
66987	117654

Таблица 2

Число элементов и узлов
конечно-элементной модели

Число элементов	Число узлов	Время построения сетки, с	
		КЭ ¹	КЭ ²
2700	4742	0,015	0,46
4252	7648	0,036	0,93
6161	10821	0,051	1,47
7865	13813	0,075	2,09
12568	22074	0,152	3,47
24693	43370	0,524	6,79
66987	117654	1,34	18,62

1 — конфигурация системы Win7/8Gb DDR3/Intel i7;
2 — конфигурация системы WinXP/1Gb DDR2/Core2Duo.

кой производительностью. Соответственно выбираем число элементов 6161 и число узлов 10 821.

Поскольку в подвижной массе происходит отклонение той части, где расположены интерферометры Фабри-Перо, то необходимо создать ограничение на перемещение противоположного конца подвижной массы. В данном случае подвижная масса с закрепленными на ней интерферометрами Фабри-Перо эквивалентна жесткой заделке по ограничениям, накладываемым на степени свободы в основании заделки.

Для дальнейших расчетов необходимо сгенерировать файл PASS, содержащий все основные характеристики созданной модели. Для генерации PASS файла использованы два вида анализов — статический и модальный.

Поскольку выходной моделью должна быть модель, описанная на языке VHDL-AMS, то после проведения всех необходимых видов анализа необходимо воспользоваться утилитой ROMTool, входящей в состав

программного пакета ANSYS. Для этого необходимо подключить базу данных модели, созданную ранее. Следует отметить, что в нашем случае создана 3D модель и необходимо выбрать соответствующую опцию в диалоговом окне подключения базы данных модели. Далее выполняется статический анализ. Предварительно необходимо определить нагрузку на модель. Для этого, используя инструменты программного пакета ANSYS, задается нагрузка.

Следующим шагом является проведение модального анализа. Перед проведением модального анализа необходимо очистить модель. Для этого необходимо обновить структурный файл и провести статический анализ еще раз, но с отключенной опцией слежения за жесткостью при геометрических нелинейных расчетах, поскольку программный пакет ANSYS не может провести модальный анализ сразу после статического с включенной опцией слежения за жесткостью при геометрических нелинейных расчетах. Обновление структурного файла и проведение повторного статического расчета производится при помощи командной строки. Затем выполняется модальный анализ. После выполнения модального анализа необходимо создать поверхности отклика, а после этого создать базу данных ROMTool.

Затем производится генерация поверхности и ее сохранение в созданную базу ROMTool. Таким образом, были созданы две базы данных, содержащие в себе модель механической подсистемы микрооптоэлектромеханического акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо и результаты статического и модального анализов. Ба-

за данных ROMTool содержит полученные данные, позволяющие экспортировать макромоделю на языке формального описания VHDL/AMS [9, 11–16].

Предложенный алгоритм был протестирован на примере акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо со следующими параметрами: длина подвижной массы механической подсистемы менялась от 100 до 400 мкм; ее ширина равнялась 30 мкм, а толщина 20 мкм; возможный технологический дрейф составлял от 2 до 3 мкм.

Отметим, что указанный технологический дрейф равен: от 0,5 до 2 % при изменении длины от 100 мкм до 400 мкм; 7 % при заданной ширине 30 мкм и 10 % при заданной толщине 20 мкм.

Исследование собственных частот механической подсистемы проводилось при помощи модального анализа, проведенного в программном комплексе ANSYS. Далее представлены результаты экспериментального исследования.

На рисунках 6–8 показано влияние на собственные частоты изменений одного из трех линейных размеров подвижной массы механической подсистемы микрооптоэлектромеханического акселерометра.

Из приведенных результатов исследований следует, что технологический дрейф от 2 до 3 мкм оказывает значительное влияние на собственные частоты механической подсистемы микрооптоэлектромеханического акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо.

Поскольку время отклика также является важным параметром работы каждого устройства, так как отражает быстродействие, проведено экспериментальное исследование влияния

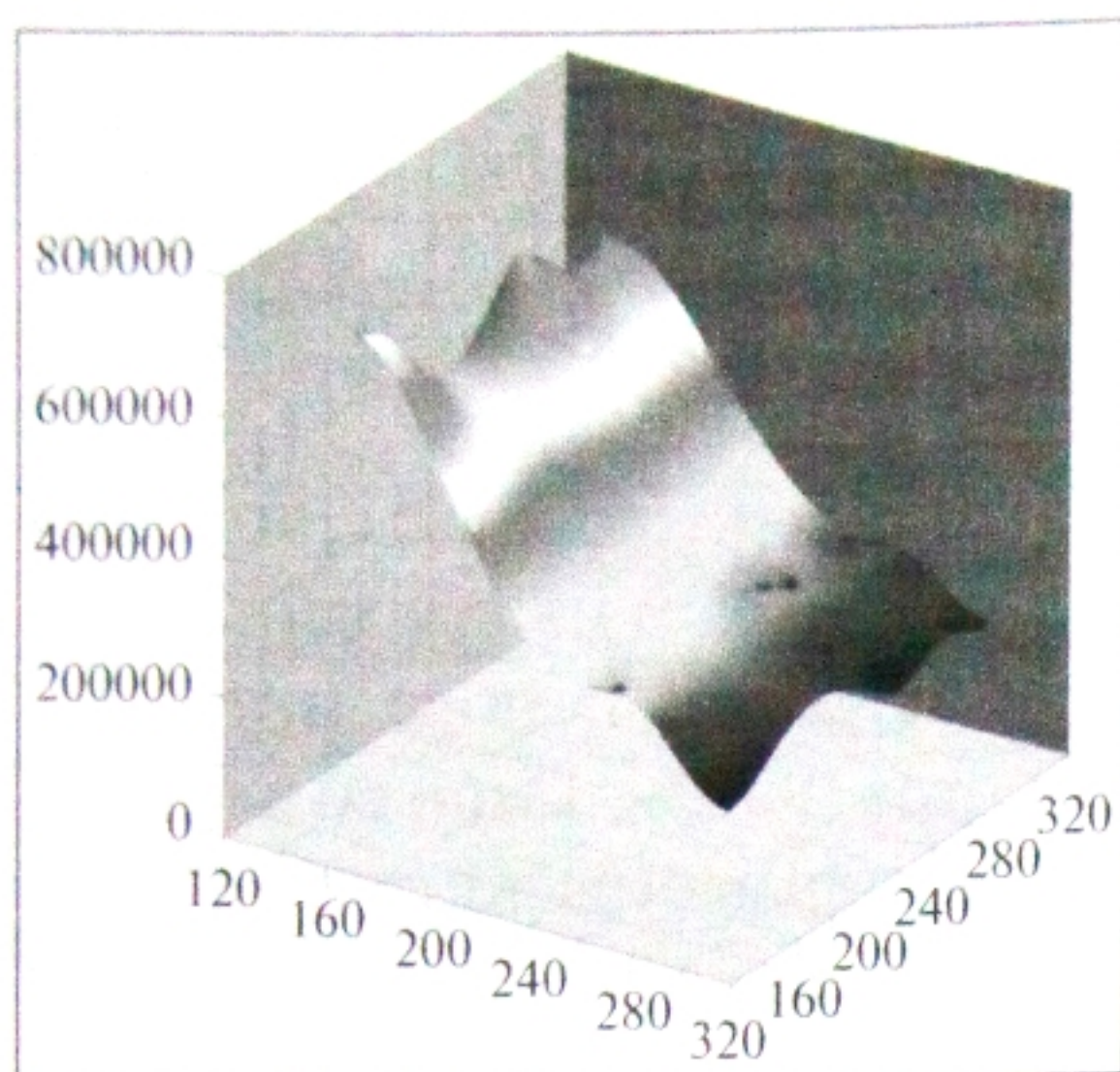


Рис. 6. Влияние изменения длины подвижной массы на собственные частоты в диапазоне от 1 Гц до 100 ГГц

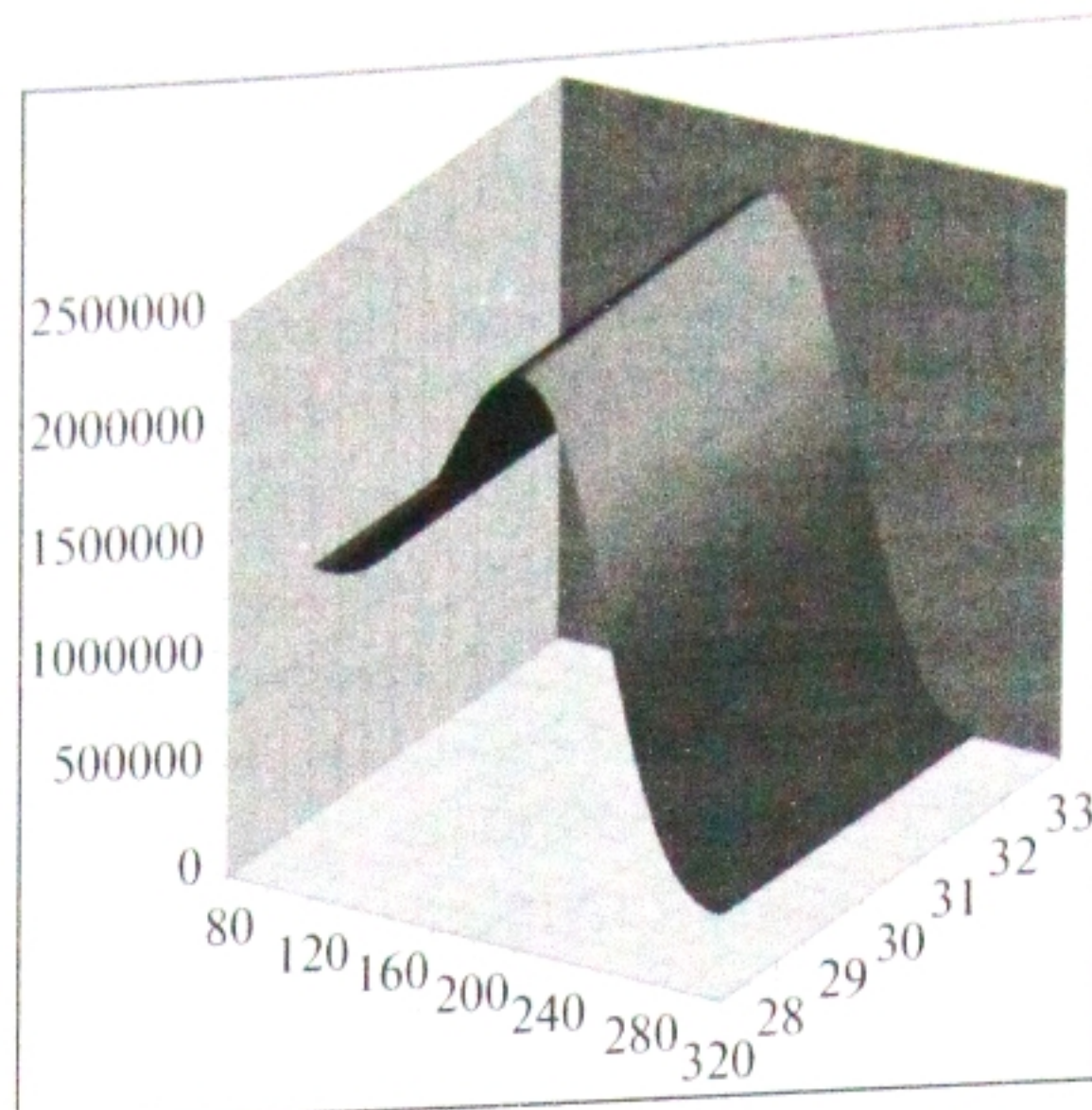


Рис. 7. Влияние изменения ширины подвижной массы на собственные частоты в диапазоне от 1 Гц до 100 ГГц

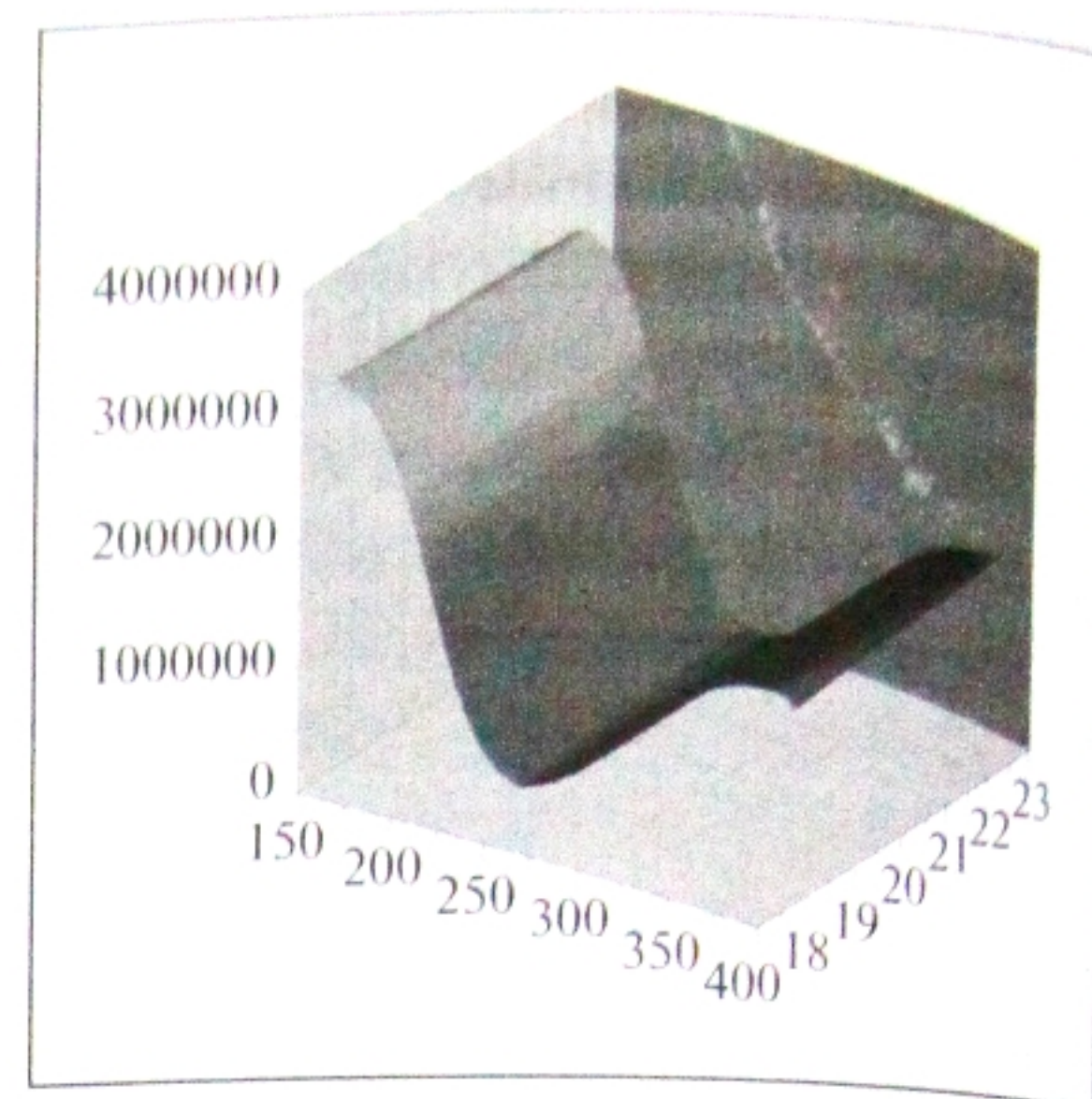


Рис. 8. Влияние изменения толщины подвижной массы на собственные частоты в диапазоне от 1 Гц до 100 ГГц

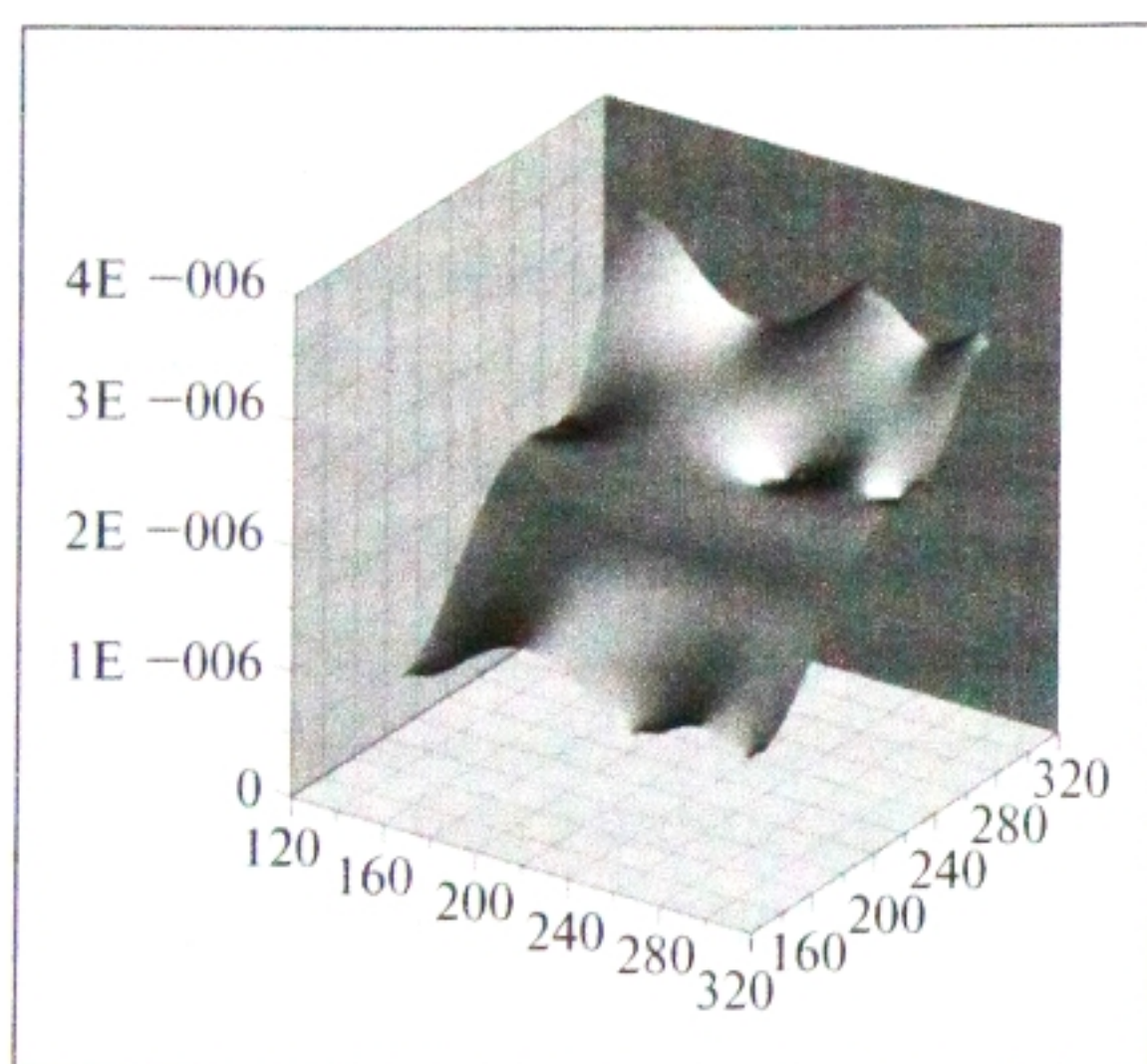


Рис. 9. Влияние изменения длины подвижной массы на время отклика всей системы в целом в результате технологического дрейфа

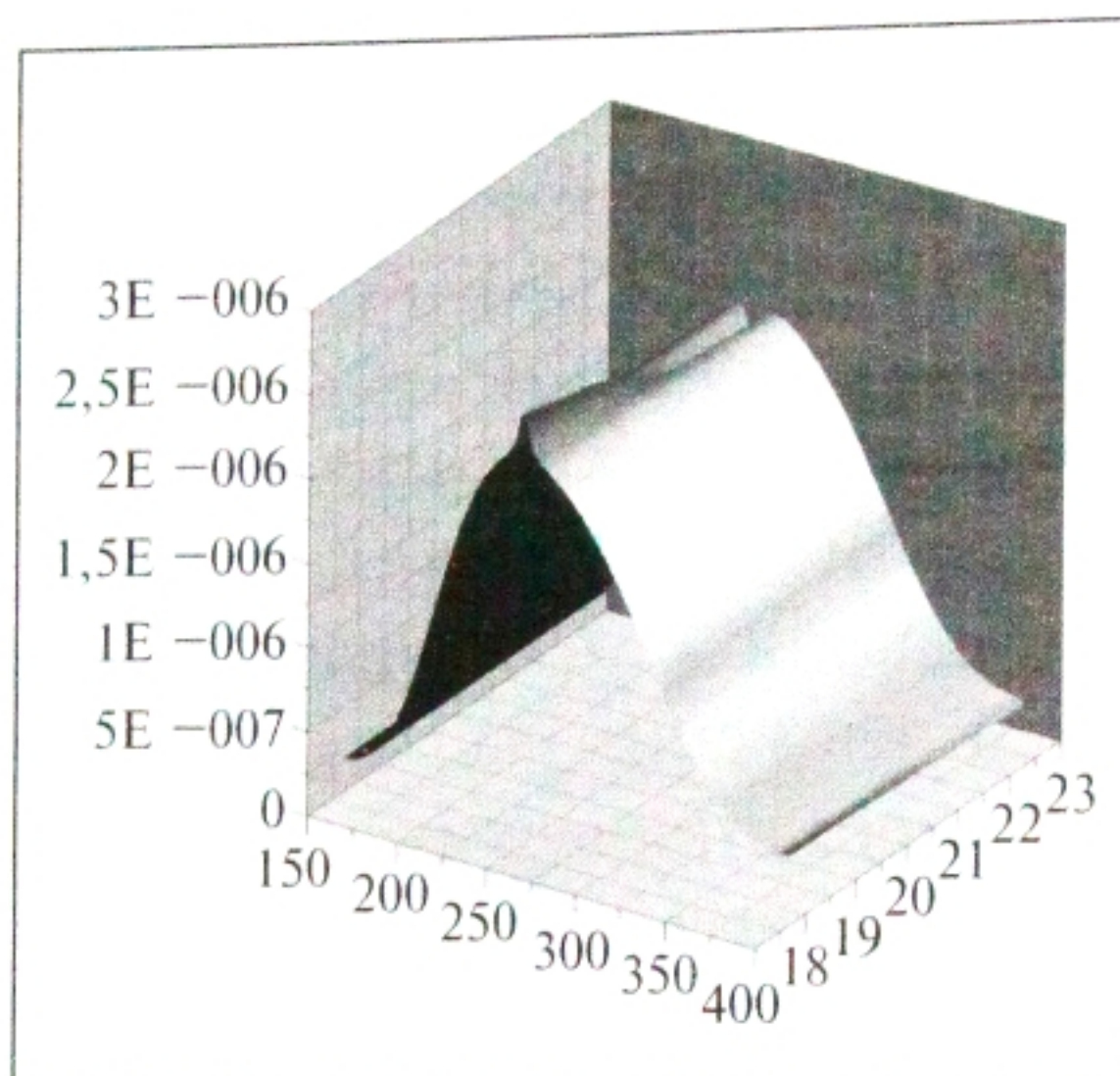


Рис. 10. Влияние изменения ширины подвижной массы на время отклика всей системы в целом в результате технологического дрейфа

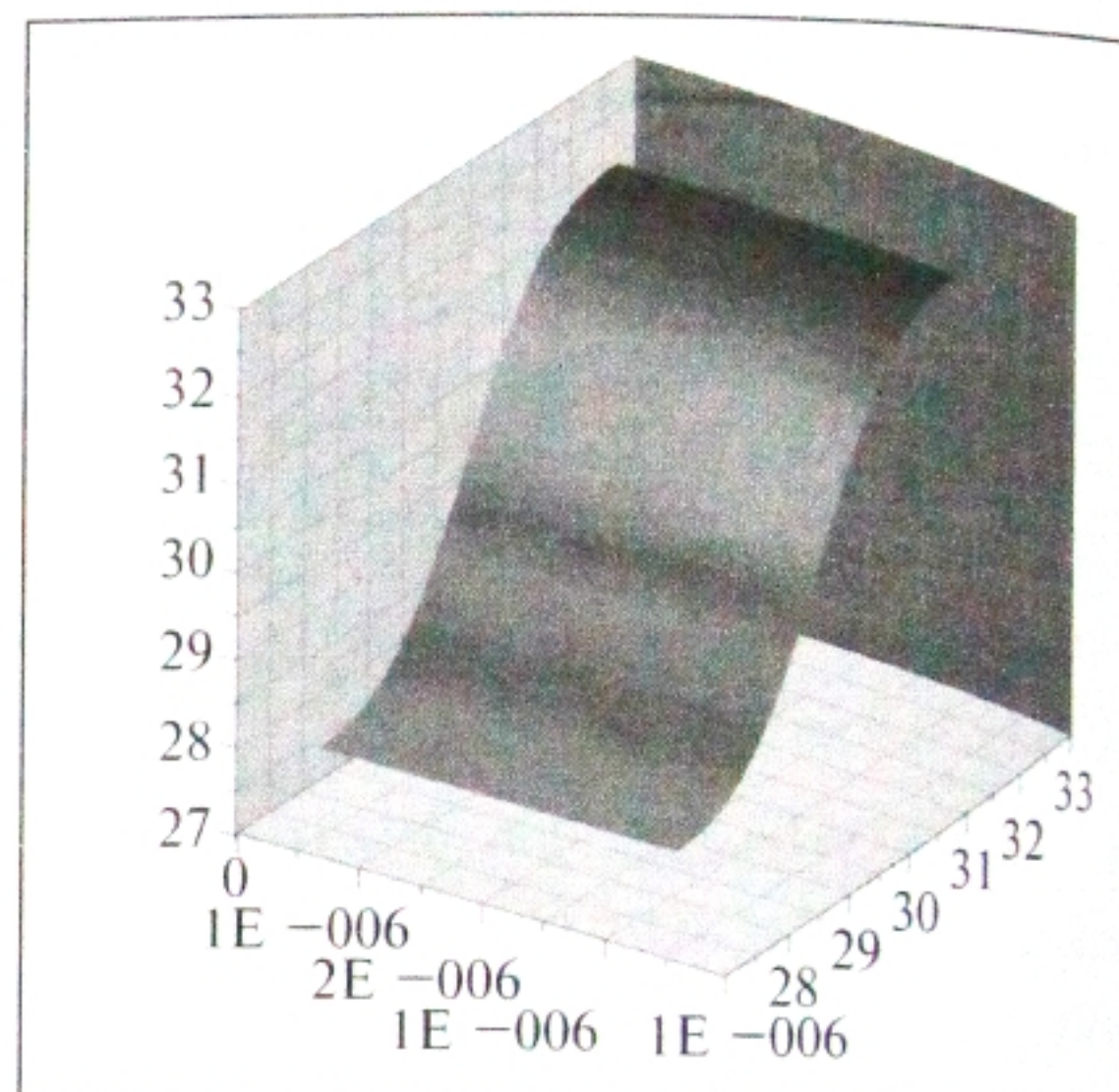


Рис. 11. Влияние изменения толщины подвижной массы на время отклика всей системы в целом в результате технологического дрейфа

технологического дрейфа размеров подвижной массы механической подсистемы на время отклика всей системы в целом.

Результаты экспериментального исследования представлены в виде построенных поверхностей, отражающих зависимость времени отклика всей системы от технологического дрейфа линейных размеров механической подсистемы (рис. 9–11).

Моделирование подвижной массы механической подсистемы проводилось с использованием разработанного модуля, что сократило время моделирования системы, а также время создания математической моде-

ли и проведения моделирования и получения значений собственных частот подвижной массы с учетом технологического дрейфа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многомасштабное моделирование МОЭМС является нетривиальной междисциплинарной задачей, решение которой осуществляется на языке формального описания VHDL-AMS с использованием предложенных алгоритмов и методов многомасштабного иерархического моделирования МОЭМС.

Разработанный модуль позволяет проводить адаптацию сетки конечных элементов с учетом линейных размеров ме-

ханической подсистемы и получать выходной файл с описанием механической подсистемы на языке VHDL-AMS.

В основе данного модуля лежит параметризация процесса создания математической модели, процесса разбиения на конечные элементы, процесса ограничения степеней свободы, приложения нагрузки, предварительного расчета деформируемых областей, перестроение сетки конечных элементов, моделирование поведения математической модели механической подсистемы и последующая конвертация математической модели на язык VHDL-AMS.

Модуль для программного комплекса ANSYS реализован на языке APDL. Данный модуль позволяет сократить время на создание математической модели механической подсистемы с учетом технологического дрейфа и передать расчет сетки конечных элементов от пользователя в программный комплекс ANSYS.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шахнов В. А., Зинченко Л. А. и др. Энциклопедия ЮНЕСКО // Сер. "Нанонаука и нанотехнологии". — Изд-во ЮНЕСКО, 2011.
2. Шахнов В. А., Зинченко Л. А. Особенности применения вычислительных систем в САПР нанотехнологий // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. Спец. выпуск "Нанотехнологии". — С. 100—109.
3. Варадан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение: Пер. с англ. — М.: Техносфера, 2004. — 525 с.
4. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. — М.: УРСС, 2009.
5. Басов К. А. CATIA и ANSYS. Твердотельное моделирование. — М.: Пресс, 2008.
6. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 446 с.
7. Растрюгин Л. А. Адаптация сложных систем. — Рига: Зинатне, 1981.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: МГУ, 1973.
9. Яшин К. Д., Осипович В. С., Божко Т. Г. Разработка МЭМС // Нано- и микросистемная техника. — 2008. — № 1. — С. 28—34.
10. Косолапов И. А. Моделирование микроакселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо в САПР ANSYS // Сб. трудов "Научные технологии и интеллектуальные системы". — Москва, 2009. — С. 98—100.
11. Косолапов И. А. Междисциплинарные связи в многомасштабном моделировании микрооптоэлектромеханических систем // Сб. трудов "Научные технологии и интеллектуальные системы". — Москва, 2011. — С. 205—209.
12. Басов К. А. ANSYS и LMS Virtual Lab. Геометрическое моделирование. — М.: ДМК-Пресс, 2006.
13. Senturia S. S. D. Microsystem Design. — 2001. — 720 с.
14. Назаров А. В. Многокомпонентное 3D проектирование наносистем: учеб. пособие. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. (Библиотека "Нанотехнологии" Кн. 4). — 392 с.
15. Денисов А. А., Кальнов В. А., Шахнов В. А. Проектирование наносенсоров: учеб. пособие. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. (Библиотека "Нанотехнологии" Кн. 6). — 128 с.
16. Денисов А. А., Кальнов В. А., Шахнов В. А. Проектирование оптической элементной базы наносистем: учеб. пособие. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. (Библиотека "Нанотехнологии" Кн. 7). — 144 с.

Людмила Анатольевна Зинченко — д-р техн. наук, профессор кафедры;

☎ 8-499-263-65-53

E-mail: zinchenko@bmstu.ru

Илья Анатольевич Косолапов — ассистент кафедры;

☎ 8-499-263-65-53

E-mail: nanosystems@iu4.ru

Вадим Анатольевич Шахнов — д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, зав. кафедрой, член-корреспондент РАН.

☎ 8-499-263-65-52

E-mail: shakhnov@iu4.bmstu.ru

