

УДК 658.512.4.01

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Д.т.н. И.Ш. Невлюдов¹, к.т.н. В.В. Евсеев¹, В.О. Бортникова¹, Я.О. Замирец²

1. Харьковский национальный университет радиоэлектроники

2. Государственное предприятие Научно-исследовательский технологический институт приборостроения, г.Харьков

В статье проанализированы современные средства, автоматизации проектирования МЭМС устройств: Coventor Ware, Tanner Pro, ANSYS, MEMCAD, COMSOL Multiphysics, SUGAR

В статті проаналізовано сучасні засоби автоматизації проектування МЕМС пристроїв: Coventor Ware, Tanner Pro, ANSYS, MEMCAD, COMSOL Multiphysics, SUGAR

The modern MEMS devices design CAD tools such as: Coventor Ware, Tanner Pro, ANSYS, MEMCAD, COMSOL Multiphysics, SUGAR are analyzed In the article.

Ключевые слова: МЭМС, технологический процесс, система автоматизированного проектирования

Введение

На сегодняшний день самым перспективным является рынок микроэлектромеханических систем (МЭМС). Объем производства и разнообразие этих систем постоянно растет и развивается. МЭМС имеют разнообразную сферу применения от бытовой техники и до космических аппаратов. МЭМС обладает огромными преимуществами: высокая функциональность; надёжность; малое энергопотребление; возможность интеграции электроники с механическими, оптическими и прочими узлами; малый разброс параметров в пределах одной партии изделий; высокая технологичность и повторяемость; возможность достичь очень низкой стоимости (при больших или очень больших объёмах производства). Но самым важным фактором их особенности является размеры – они малы и порою достигают атомных масштабов.

Несмотря на это МЭМС значительно отличаются от существующих технологий микроэлектроники, что требует совершенно других подходов и умений для их осуществления. МЭМС технологии включают в себя: масштабирование, корпусирование, тестирование и т.д. Данные технологии часто сталкиваются с проблемами, связанными с разработкой технологических процессов, которые на сегодняшний день не соответствуют существующим методам.

Важной составляющей разработки МЭМС являются системы автоматизированного проектирования (САПР). Данные системы обеспечивают эффективность разработки, которая зависит от правильности выбора материала конструкции, разработки рабочей модели конструкции, подбора и оптимизации параметров отдельных элементов, проектирования, выбора технологии и организации производства МЭМС. Из-за сложности разработки технологического процесса теряется точность и усложняется процесс разработки

программных продуктов. Эта задача должна учитывать многофакторные условия не только конструкций МЭМС, но и обеспечивать возможность разработки технологического процесса с расчетом стоимости и времени изготовления МЭМС, учитывая сложность и большую трудоемкость проектирования и изготовления.

Постановки задачи

Для изготовления МЭМС устройств существует ряд таких проблем [1]:

- в связи с высокой степенью интеграции МЭМС имеет междисциплинарный характер, существуют трудности в процессе создания и изготовления конструкции. На этапе разработки МЭМС устройства значительное время и затраты расходуются в течение этого этапа и последующего этапа прототипирования;

- на этапе моделирования и симуляции важно обеспечить доступ МЭМС разработчикам к соответствующим аналитическим инструментам. В настоящее время разработчики МЭМС используют инструменты проектирования, которые не полностью удовлетворяют все необходимые потребности. Однако, необходимы более мощные и передовые методы и инструменты моделирования, которые в состоянии точно обеспечить прогнозирование поведения МЭМС устройств;

- на этапе корпусирования и тестирования устройства так же существуют проблемы. Корпус МЭМС должен обеспечить защиту от окружающей среды и доступ к устройству. В настоящее время не существует общего решения для корпусирования МЭМС устройства, требующего специализированного формата.

Так же существует ряд проблем связанных с созданием нормативной базы. В связи с относительно низким числом коммерческих устройств МЭМС и скоростью, с которой в настоящее время развивается технологии, стандартизация является затруднительной. На сегодняшний день, высокий контроль качества и основные формы стандартизации, как правило, можно найти только в нескольких инвестиционных объектах.

Таким образом, сборка и корпусирование сложных МЭМС является чрезвычайно сложным процессом. Стандартная автоматизированная сборка и упаковка микроэлектроники не подходит для такого микроуровня. Сегодня многие МЭМС устройства требуют индивидуального внимания, а этапы проектирования и исследования прототипа МЭМС устройства являются самыми дорогими этапами изготовления и часто составляют 90% (или более) из конечной стоимости МЭМС устройства [2]. В результате конечная стоимость устройства может быть в 100 раз выше стоимости фактических затрат на компоненты.

Анализ современных средств автоматизированного проектирования МЭМС

Для автоматизированного проектирования МЭМС необходимы интегрированные системы, включающие в себя подсистемы:

- проектирование на компонентном уровне;
- проектирование на междисциплинарном уровне;
- проектирование электронных компонентов;
- проектирование с учетом обеспечения надежного функционирования МЭМС [3].

На данный момент времени используются такие современные системы как:

- Coventor Ware (проектирование и моделирование МЭМС устройств);
- Tanner Pro (система схемотехнического моделирования микросистем);
- программный комплекс ANSYS (универсальная программная система конечно-элементного анализа);
- программный комплекс COMSOL Multiphysics (интерактивная среда, предназначенная для моделирования и расчетов большинства научных и инженерных задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных методом конечных элементов);
- MEMCAD (пакет программ для электростатического и механического анализа микроструктур);
- модуль SUGAR (совокупность модулей Matlab, которые реализуют метод узлового анализа для моделирования МЭМС на компонентном и системном уровне).

Система Coventor Ware представляет собой интегрированный пакет, осуществляющий детальный анализ устройства с набором решателей методом конечных и граничных элементов и представляет собой интегрированный пакет проектирования и моделирования программного обеспечения для решения МЭМС конструкций. При преобразовании 2D-в-3D модели происходит автоматическое построение сетки конечных элементов и анализатора полей, которые оптимизированы для МЭМС структур и мультифизики.

В подсистеме есть много специфических функций для моделирования и симуляции широкого спектра МЭМС устройств, в том числе инерциальных датчиков (акселерометров и гироскопов), микрофонов, резонаторов и приводов. Анализаторы полей обеспечивают полный охват мультифизики.

Во избежание необходимости создания прототипов и повышения выпуска, Coventor предлагает два отдельных продукта, Coventor Ware Designer и SEMulator3D. Оба продукта генерируют 3D модели МЭМС путем объединения 2D проектных данных (макета) с описанием процесса, однако конструктор производит идеализированные структуры, в то время как SEMulator3D включает технологию моделирования, которая позволяет виртуальное изготовление [4].

SEMulator3D модели включает реалистичные эффекты обработки, такие как осаждения на округлых маловыступающих областях, нежелательных пустот и неполного выпуска подтравливания.

Coventor Ware состоит из 4 основных и нескольких дополнительных программ [4-6]:

- программа Architect обеспечивает групповую разработку проектов МЭМС устройств на основе поведенческих моделей (сверху вниз). Содержит в себе несколько модулей: разработка структур, принципиальных схем, а так же модуль моделирования и генерирования 2D описания топологии;
- программа Designer используется для разработки средств для 2D и 3D проектирования МЭМС. Содержит в себе редактор 2D топологии, модуль форматирования 3D модели устройства, базу данных материалов, эмулятор технологического процесса.
- программа Analyzer используется для комплексного моделирования всех физических процессов (имеет очень большое количество модулей для различного моделирования);
- пакет Integrator обеспечивает извлечение поведенческих моделей из устройства, разработанных в Designer и промоделированных в Analyzer.

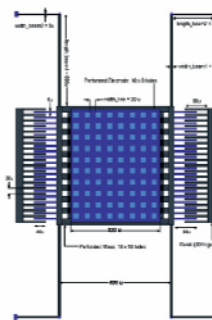


Рис. 1. Чертеж гироскопа МЭМС, разработанный с помощью Coventor

Coventor предлагает отдельный пакет MEMS+, который представляет собой специализированный программный продукт, предназначенный для разработки МЭМС в тесной интеграции с потоком проектирования интегральных микросхем компании Cadence. Основная задача программы - выполнить проектирование и анализ МЭМС устройства оригинальными средствами Coventor, после чего сформировать данные для программного обеспечения Cadence: библиотеки символов для редактора схем Cadence Virtuoso, списки соединений для мультифизического моделирования с помощью модулей Spectre и UltraSim, а также топологические ячейки P-Cell для редактора топологий микросхем

Недостатками Coventor Ware является то, что она представляет собой достаточно сложную систему. Для использования Coventor Ware необходимо устанавливать дополнительные средства такие как, например, MATLAB. Этот программный продукт предназначен, в основном, для моделирования и симулирования МЭМС устройств.

Не имеет возможности автоматизации проектирования технологического процесса изготовления МЭМС.

Tanner Pro представляет собой набор программного обеспечения для проектирования, компоновки и проверки аналоговых, смешанных сигналов, радиочастот и МЭМС микросхем. Tanner Tools Pro состоит из полностью интегрированной передней части и серверных инструментов, от схематического захвата и моделирования электронных схем, и волны зондирования для физического размещения и проверки.

В состав Tanner Pro входят следующие основные подсистемы [6-7]:

- MEMSlib (библиотека компонентов микросистемной техники);
- S-Edit (схемный редактор, предназначенный для создания и редактирования электрических схем проектов);
- L-Edit (топологический редактор, предназначенный для синтеза топологии в автоматическом или интерактивном режимах, проверки правил проектирования, экстракции схемы проекта из топологии, сохранения топологии проекта в виде файлов стандартных форматов);



Рис. 2. Окно библиотеки макросов в редакторе L-Edit

- T-Spice Pro (подсистема схемотехнического моделирования проектов. T-Spice Pro включает: S-Edit для схематического захвата, T-Spice для моделирования схемы, и W- Edit для просмотра и анализа осциллограмм. T-Spice Pro помогает интегрировать проектный поток начиная со схематического захвата с помощью моделирования и просмотра сигнала).

К недостаткам данной системы можно отнести отсутствие возможности автоматизации проектирования технологического процесса с расчетом трудоемкости изготовления. Система Tanner Pro имеет достаточно узконаправленную специализацию и направлена на решение определенных задач.

Программный комплекс ANSYS представляет собой полный набор программного обеспечения, которое охватывает весь спектр физики, обеспечивая доступ к практически любой области инженерного моделирования, чего требует процесс проектирования.

Большие функциональные возможности ANSYS обеспечиваются благодаря наличию множества специализированных программ. В состав ANSYS входят такие программы [8-9]:

- ANSYS Multiphysics - это решение для анализа сложных изделий в одной или нескольких областях физики. Данный программный модуль включает в себя инструменты для выполнения прочностного, теплового анализа, анализа низкочастотных и высокочастотных электромагнитных явлений, анализа динамики жидкостей и газов. Продукт включает в себя как решение междисциплинарных задач с прямым, так и с последовательным сопряжением областей физики. В ANSYS Multiphysics присутствуют элементы с напрямую сопряженными полями и междисциплинарный решатель ANSYS Multi-field.

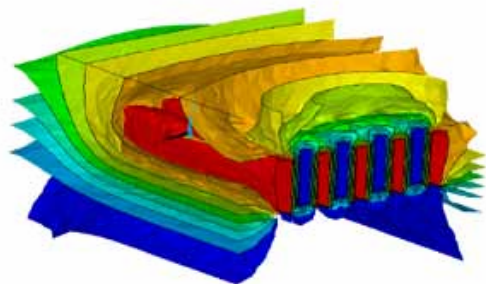


Рис. 3. Симуляция МЭМС актюатора в ANSYS Multiphysics

- ANSYS Mechanical - комплексное решение для выполнения линейного и нелинейного анализа прочности и динамического анализа. Также модуль дает возможность выполнения теплового анализа, междисциплинарного анализа, в том числе акустического, пьезоэлектрического, электротермического и теплового анализа прочности.

- ANSYS Thermal модуль, позволяющий определять поля температур из решения задач стационарной и нестационарной теплопроводности, конвекции, теплообмена излучением.

- ANSYS Structural модуль, используемый для решения задач прочности. Данный программный продукт обеспечивает более мощные возможности линейных и нелинейных расчетов прочности и позволяет получить максимально точные результаты.

- ANSYS LS-DYNA чаще используется для решения задач кратковременного динамического взаимодействия твердых тел при средних или высоких нагрузках, ударных задач, задач штамповки и отливки. ANSYS LS-DYNA поддерживает двумерные и трехмерные явные конечные элементы, свойства, полный набор контактов для одиночной поверхности, поверхность-поверхность, поверхность-узел, и позволяет автоматически создавать контакты на поверхностях. Программа также предоставляет дополнительные методы для быстрой обработки результатов решения. Методы параллельных вычислений значительно повышают

производительность программы путем использования нескольких процессоров, ядер или узлов.

- ANSYS ED программа, владеющая возможностями ANSYS Multiphysics, но с рядом ограничений и предназначена для обучения.

Недостатками ANSYS является то, что математическое обеспечение рассчитано на решение отдельных классов задач. При этом система не позволяет решать задачи связанные с подготовкой производства разрабатываемых МЭМС.

Пакет программ MEMCAD предназначен для разработки и моделирования МЭМС от начала до конца: от первичной концепции через полный сопряженный анализ до разработки параметров корпусирования и экстракции моделей высокого уровня для моделирования системы. Этот пакет содержит ряд программ различного назначения: AutoSpring, BubbleSim, Catapult, Designer, DropSim, MemDemping, MemETherm, MemHenry, MemPackage, MemPZR, MemSys, MemTherm, ReactSim [9-10].



Рис. 4. Архитектура MEMCAD

- AutoSpring (программный модуль анализирует поведение констант упругости при колебании);

- BubbleSim программный модуль для разработки микрожидкостных МЭМС, позволяющий проводить полное трехмерное численное моделирование движения пузырьков и окружающих жидкостей в микроканалах;

- Catapult 2D-редактор предназначенный для создания топологии элементов. Он имеет возможность создания настоящих кривых, создания топологии и ячеек под любым углом; преобразование ломаных элементов GDSII в сглаженные кривые; наличие библиотеки специализированных элементов МЭМС;

- Designer предназначен для создания жестких моделей, готовых к изготовлению изделий МЭМС и для моделей электромеханических, жидкостных, оптических и радиочастотных систем;

- DropSi программа для моделирования поведения микрожидкостей. Она позволяет проводить 3D численное моделирование формирования капель, их переноса и столкновения;

- MemDemping программный модуль, с помощью которого анализируются характеристики затухания и упругости функционирующего окружения для приборов МЭМС;

- MemETherm программа для анализа структурной деформации изделий МЭМС вследствие Джоулева нагрева;

- MemHenry программа, которая поддерживает полный 3D индукционно-механический анализ МЭМС, и определяет частотную зависимость R, L, и C для СБИС и RF анализа межсоединений. В комбинации с MemMech и MemHenry она вычисляет деформационно-зависимую индуктивность и сопротивление как функцию частоты;

- MemPackage – программа для моделирования корпусирования. Позволяет анализировать воздействие на изделия МЭМС эффектов, возникающих в процессе корпусирования;

- MemPZR программа моделирования пьезорезистивных эффектов, основанная на полном трехмерном теоретическом моделировании;

- MicroSys интегрированное решение для моделирования приборов МЭМС совместно со схемой обработки сигнала на системном уровне. Позволяет: автоматически встраивать результаты 3D моделирования в физически корректную макромодель со степенью свободы 6°; поддерживать экстракцию параметров, таких как напряжение, емкость, размеры, вращение, масса и др.; обладает мощной схмотехнической базой, программой моделирования системы, генератором временных импульсов, библиотекой механических/смешанных элементов.

- MemTherm анализирует статическое и динамическое поведение МЭМС приборов, обусловлено изменениями температуры;

- ReactSim программа, предназначенная для 3D численного моделирования многочисленных потенциально равновесных химических реакций, учитывающих поток жидкостей, перенос тепла, диффузию и электрокинетику. Она моделирует химические реакции в объеме жидкости и на поверхности.

Недостатками MEMCAD является отсутствие решений в области производства МЭМС, что не дает возможности полностью охватить процесс проектирования и разработки технологических процессов, что существенно ограничивает ее функциональные возможности.

COMSOL Multiphysics - программная среда, обеспечивающая все этапы моделирования (определение геометрических параметров, описание физики, визуализация), позволяющая моделировать любые физические процессы, которые могут быть представлены в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных [12-13].

COMSOL Multiphysics содержит в себе модули общего назначения, модули взаимодействия с другими программами, модули отраслевых решений и модули-интеграторы.

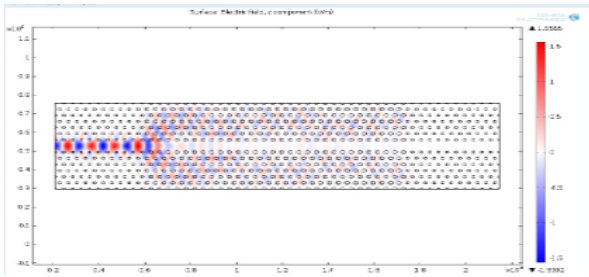


Рис. 5. Исследование фотонно-кристаллического волновода в COMSOL Multiphysics

К модулям общего назначения относятся:

- Particle Tracing Module (позволяет провести автоматический расчет траектории частиц с новыми встроенными инструментами, предназначенными для моделирования сил и взаимодействий между частицами);
- Material Library библиотека материалов с набором свойств;
- Optimization Module позволяет проводить оптимизацию модели для всех модулей COMSOL Multiphysics.

В модуль интеграторов входит:

- CAD Import Module позволяет импортировать оффлайн геометрические модели или геометрии из других CAD-систем;
- ECAD Import Module содержит шаблоны для построения 3D-геометрических моделей. Модуль отраслевых решений содержит в себе 4 больших блока – механика, электричество, жидкости, химия.

В блок механики входят такие основные блоки:

- Geomechanics Module (расширяет возможности в области моделирования грунтов, пород или пластических материалов);
- Structural Mechanics Module позволяет провести деформацию конструкций под воздействием нагрузки;
- Fatigue Module позволяет исследовать многоцикловую и малоцикловую усталость материалов;
- Nonlinear Structural Materials Module позволяет исследовать упругопластичные, вязкопластичные и гиперпластичные модели материалов;
- Acoustics Module решает задачи аэроакустики, гидроакустики, строительной акустики и др.;
- Heat Transfer Module позволяет провести расчеты теплопередачи, теплопроводности, конвекции или излучения;
- Multibody Dynamics Module исследует динамику сложных механических систем.

В блок электричество входят такие основные блоки:

- AC/DC Module предназначен для моделирования электромагнитных явления и устройства на низких частотах;
- RF Module предназначен для моделирования электромагнитных явлений на высоких частотах;

- MEMS Module предназначен для МЭМС, мультифизических приложений электромагнитных задач физики;
- Plasma Module (все типы неядерных плазменных реакторов);
- Wave Optics Module (оптические компоненты);
- Semiconductor Module (физика полупроводников).

В блок жидкости входят такие основные блоки:

- CFD Module (течение жидкостей в диапазоне дозвуковых и сверхзвуковых скоростей);
- Microfluidics Module (динамика жидкостей в микроканалах);
- Subsurface Flow Module анализ подповерхностных течений;
- Molecular Flow Module (физика разреженных газов);
- Pipe Flow Module динамика жидкости, тепло- и массообмена, гидравлические переходные процессы;
- Mixer Module (перемешивающие химические реакторы и ротационные машины для жидких сред).

В блок химии входят такие основные блоки:

- Electrodeposition Module (противокоррозионная защита, металлизация или гальванопластика);
- Batteries & Fuel Cells Module решение электрохимических задач;
- Corrosion Module (гальваническая, точечная и щелевая коррозии);
- Chemical Reaction Engineering задачи химии и химической промышленности;
- Electro-chemistry Module (электрохимические реакции, электролиз).

В модуле взаимодействия содержатся такие модули для работы с Creo Parametric, Inventor, Matlab, AutoCAD, SolidWorks, Excel, Pro/Engineer, SpaceClaim, Solid Edge.

Недостатками COMSOL Multiphysics является необходимость в высоких вычислительных мощностях. Многомодульная структура усложняет процесс проектирования МЭМС.

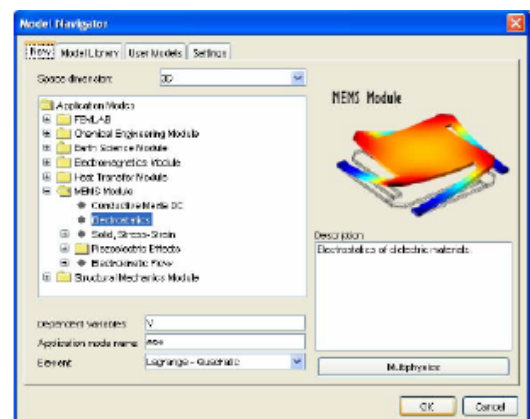


Рис. 6. Специализированный модуль для моделирования элементов МЭМС в COMSOL

Модуль SUGAR предназначен для проектирования МЭМС на компонентном и системном уровне в пакете программ MatLab/Simulink [14, 15]. SUGAR является инструментом моделирования для устройств МЭМС на основе методов узлового анализа комплексного моделирования схемы. Балки, электростатические пробелы, элементы схемы и т.д. моделирует небольшие, связанные системы дифференциальных уравнений.

SUGAR базируется на использовании дифференциальных моделей.

В модуле SUGAR имеется три ключевых модуля пакета:

- ввод информации;
- анализ;
- представление результатов.

Анализ планарных МЭМС устройств в SUGAR представлен набором функций Matlab, которые включает в себя решатели для статического анализа, анализа устойчивого состояния, анализа переходных процессов и т.д. МЭМС разработчик может описать устройство в формате компактного списка, и очень быстро моделировать поведение устройства. Используя простые моделирования в SUGAR, разработчик может быстро найти проблемы в конструкции или опробовать новые идеи. Позже в процессе проектирования, разработчик может работать с более подробной симуляцией, чтобы проверить влияния второго порядка.

Недостатками модуля SUGAR является отсутствие библиотек стандартных математических моделей и узкая направленность данного модуля. Модуль SUGAR так же не позволяет автоматизировать технологический процесс проектирования МЭМС устройств.

Выводы

Существующие САПР МЭМС, такие как MEMCAD, Cowentor Ware, Tanner Pro, программного комплекса ANSYS, программный комплекс COMSOL Multiphysics имеют один общий недостаток, который не позволяет автоматизировать процесс проектирования технологических процессов изготовления и производства. При этом не возможно на этапе проектирования рассчитать трудоемкость изделия, что уменьшает ее конкурентноспособность за счет невозможности выбора и оптимизации технологического процесса изготовления в зависимости от оборудования и спецификации типа МЭМС.

Каждая из этих систем содержит в себе подсистемы, которые выполняют лишь отдельные функции (моделирование, анализ и т.д.), которые не позволяют реализовать сквозное проектирование, и увеличивает вероятность ошибок и неточностей в процессе передачи данных из одной подсистемы в другую.

Разработка системы автоматизированного проектирования технологического процесса, которая позволит объединить этап 3D моделирования и анализа

МЭМС устройств с проектированием технологического процесса и расчета трудоемкости в одной системе является перспективной задачей, которая позволит сократить стоимость МЭМС устройств и получить максимальный экономический эффект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Невлюдов И.Ш., Бортникова В.О. Актуальность разработки систем автоматизированного проектирования МЭМС устройств/ И.Ш. Невлюдов, В.О. Бортникова// Экономика, наука, производство: Сборник научных трудов №26. – М.: Издательство «Московский государственный открытый университет В.С. Черномырдина», 2013. – 192 с.
2. Невлюдов, И. Ш. Микроэлектромеханические системы и нанотехнологии / Невлюдов И. Ш., Андрусевич А. А., Палагин В. А.; МОН Украины. - Х. : Коллегиум - 2008. - 264 с.
3. Зинченко Л.А. САПР наносистемы: учеб.пособие/ Л.А.Зинченко. – М.:Издательство МГУ им. Баумана,2011. – 224 с.
4. MEMS Process Development, MEMS+ Overview: MEMS Simulation Software, MEMS Accelerometer Design and Simulation. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.coventor.com/>
5. Chen R.T. Leveraging mainstream design and analysis tools for MEMS/ R.T.Chen, I. Mirman//Electronics Manufacturing Technology Symposium: Proc.IEE/CPMT/SEMI 29-th International, 14-16 July, 2004. – P.332-337.
6. Лысенко И.Е. проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемой техники/ И.Е. Лысенко. – Таганрог: Издательство ТРТУ, 2005. – 103 с.
7. Tanner Laboratories: Your MEMS R&D Partner , Industry-leading Productivity for Analog, Mixed Signal and MEMS Layout from Tanner EDA, MEMS Design Software, MEMS Design Tools | Tanner EDA. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tanner.com/>
8. ANSYS Mechanical, Systems & Multiphysics Solutions.[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ansys.com/>
9. ANSYS Mechanical, ANSYS Structural, ANSYS LS-DYNA, ANSYS Multiphysics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cae-club.ru/category/programmnye-produkty/mezhdistsiplinarnyi-analiz/ansys-multiph>
10. MEMCAD ver. 4.5.[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.memcad.com/>
11. Пакет программ MEMCAD фирмы Microcosm Technologies. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.microsystems.ru/files/publ/490.htm>
12. COMSOL Multiphysics может взаимодействовать с программой MATLAB. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.humusoft.cz/produkty/comsol/ru/>
13. Product Suite.[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.comsol.com/>
14. Simulink ver. 3.0, The Mathworks. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/>
15. Jason Vaughn Clark MEMS - NEMS - CAD - CAE - metrology. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: narotama.ac.id
16. A Simulation Tool for MEMS Devices. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www-bisac.eecs.berkeley.edu/cadtools/sugar/>
17. Chollet F., Liu HB. A (not so) short Introduction to Micro Electromechanical Systems/ F. Chollet, HB. Liu. – 2013. – P. 238