

СЕКЦИЯ 2

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Среда, 27 апреля 2011 г., ауд.278 (гл. корпус МГТУ).

Начало в 10.00.

Председатель: профессор, д.т.н. Шахнов В.А.

Руководитель экспертной комиссии: профессор, д.т.н. Зинченко Л.А.

Ученый секретарь: Соловьев В.А.

Экспертная комиссия:

БИЛИБИН К. И., ГРИДНЕВ В. Н., ЖУРАВЛЕВА Л. В., ИВАНОВ Ю. В., Э.Н.КАМЫШНАЯ, ЧЕКАНОВ А.Н., МЫСЛОВСКИЙ Э.В., ЛАВРОВ А. В., МАКАРЧУК В.В., В.В.МАРКЕЛОВ, ПИРОГОВА Е. В., РЕЗЧИКОВА Е. В., ШЕРСТНЕВ В. В., КУРНОСЕНКО А.Е., А.С.КУЗНЕЦОВ, КАРПУНИН А.А., ШКОЛЬНИКОВ В.М., АРТЕМЬЕВ И.А., А.Е.МИХНЕНКО, СЕМЕНЦОВ С.Г., А.Е.АВЕРЬЯНИХИН.

В рамках работы секции будет осуществлен первый этап конкурсного отбора проектов для участия в конкурсе инновационных проектов МГТУ им.Н.Э.Баумана. Критериями конкурсного отбора участников молодежного научно-инновационного конкурса являются:

1. Уровень инновационности идеи (предложения, метода, способа ...).

1.1. Идея должна быть новой, впервые сформулированной именно самим номинантом. В этом смысле все номинанты равны. Остальные просто не могут быть номинированы на участие в этой программе.

1.2. Уровень наукоемкости тем выше, чем более:

- основательны научные исследования, в результате которых она появилась;

- основательны дальнейшие научные исследования, необходимые для ее реализации.

1.3. Техническая значимость тем выше, чем большее влияние ее реализация окажет на уровень техники. «Пионерные» идеи (изобретения) – пенициллин, лазер, синтез алмазов - открывают новые отрасли науки и техники. Идеальная по инновационности идея неожиданна для рынка. Поэтому она им не может быть сейчас востребована, она сама формирует новую потребность и нишу рынка.

Высокий технический уровень имеют решения, например, многоотраслевого использования.

Оригинальные технические решения дают новые принципы решения известной задачи.

Есть решения, позволяющие решить проблему еще одним, дополнительно к известным, способом. Но и в этом случае, если уже известно 10 способов решения задачи, то новый способ может и не давать существенных преимуществ в решении задачи или давать их только в очень ограниченном по масштабам применения числе случаев.

1.4. Масштабность использования предложения тоже может сильно различаться – от решения локальной задачи одного местного потребителя до ...

1.5. Срок превращения идеи в конечный продукт с выходом его на рынок: новизна, рискованность идеи, объем необходимых научных исследований не позволяют уложиться в 2-3 года, но и не требуют 10-15 лет

1.6. Идея тем актуальней, чем меньше вероятность того, что за 5-7 лет в результате научных исследований появятся и «раскрутятся» до продукта другие более эффективные пути решения задачи.

Победитель сам организует работу по привлечению необходимого финансирования. Инновационная программа МГТУ им.Н.Э.Баумана оказывает ему поддержку на начальном этапе работы над его идеей.

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ СВЯЗИ В МНОГОМАСШТАБНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ МИКРООПТОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Косолапов И.А.

Научный руководитель: д.т.н., профессор, Зинченко Л.А.

МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия

MULTIPHYSICS TRANSFORMATION IN MULTISCALE MODELLING OF MOEMS

Kosolapov I.A.

Supervisor: Dr., Prof., Zinchenko L.A.

MSTU, Moscow, Russia

Аннотация

В статье рассматриваются методы перехода между подсистемами различной физической природы микрооптоэлектромеханических систем. Подробно рассмотрены методы моделирования подсистем различной физической природы. Кратко рассмотрена реализация методов переходов между подсистемами различной физической природы с применением языка формального описания VHDL-AMS.

Die Inhaltsangabe

In der Artikel erachtet sich die Übergang Methoden zwischen den Teilsystemen unterschiedlicher physikalischer Natur in der Mikro-Opto-Elektromechanischen Systeme. Ausführlich betrachtet sich die Methoden der Modellierung Teilsystemen unterschiedlicher physikalischer Natur. Kurz überblicken sich die Übergang Methoden zwischen den verschiedenen Subsystemen der physikalischen Natur der Anwendung von formalen Beschreibungssprache VHDL - AMS.

Введение

В настоящее время большое распространение получили микросистемы, сочетающие в себе различные физические эффекты. Разработка методов моделирования подсистем различной физической природы [1 – 3], а так же методов перехода между подсистемами различной физической природы, является одним из важнейших задач моделирования.

В докладе на примере микрооптоэлектромеханического акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо рассматривается моделирование подсистем различной физической природы, а так же методы перехода между ними с использованием языка формального описания VHDL-AMS.

Междисциплинарные связи между подсистемами различной физической природы

В микрооптоэлектромеханических системах [6] можно выделить три основные подсистемы: оптическую, механическую и электрическую/

В рамках исследований проводилось моделирование оптической, механической и управляющей подсистем. В докладе представлены результаты, полученные при моделировании этих подсистем.

Оптическая подсистема моделировалась в пакете MATLAB/Simulink. Данный пакет выбран, исходя из совместимости с языком VHDL-AMS.

VHDL это формальный язык описания цифровой аппаратуры. Расширение AMS позволяет описывать смешанные аналого-цифровые устройства. В [4, 7] приведены математические модели оптической подсистемы исследуемого микрооптоэлектромеханического акселерометра:

$$I = I_0 \frac{R_0 + F \sin \eta \left[R_1 \sin \eta - \frac{\rho_1 \tau_1 \tau_1'}{\rho_1} \sin(\eta + 2\eta_0) \right]}{1 + F \sin^2 \eta} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} n t \cos \theta' \quad (2)$$

$$\tau_1 \tau_2' = \sqrt{T_1 T_2'} = T, \rho_1' \rho_2' = \sqrt{R_1' R_2'} = R \text{ и } \alpha_1' + \alpha_2' = \alpha \quad (3)$$

$$I = I_0 \frac{T_1 T_2'}{(1 - \rho_1' \rho_2') + 4 \rho_1' \rho_2' \sin^2(\frac{\alpha_1' + \alpha_2' + \delta}{2})} \quad (4)$$

$$I = I_0 \frac{T^2}{(1 - R)^2 + 4R \sin^2(\frac{\alpha + \delta}{2})} \quad (5)$$

Выбранные модели были реализованы в специальном модуле в пакете MATLAB/Simulink, позволяющем рассчитывать параметры интерферометра. На основе разработанного программного обеспечения были получены зависимости чистоты отражения от коэффициента отражения зеркала (рис. 1), зависимость коэффициента контрастности от коэффициента отражения (рис. 2), а так же интенсивность излучения после прохождения интерферометра (рис. 3).

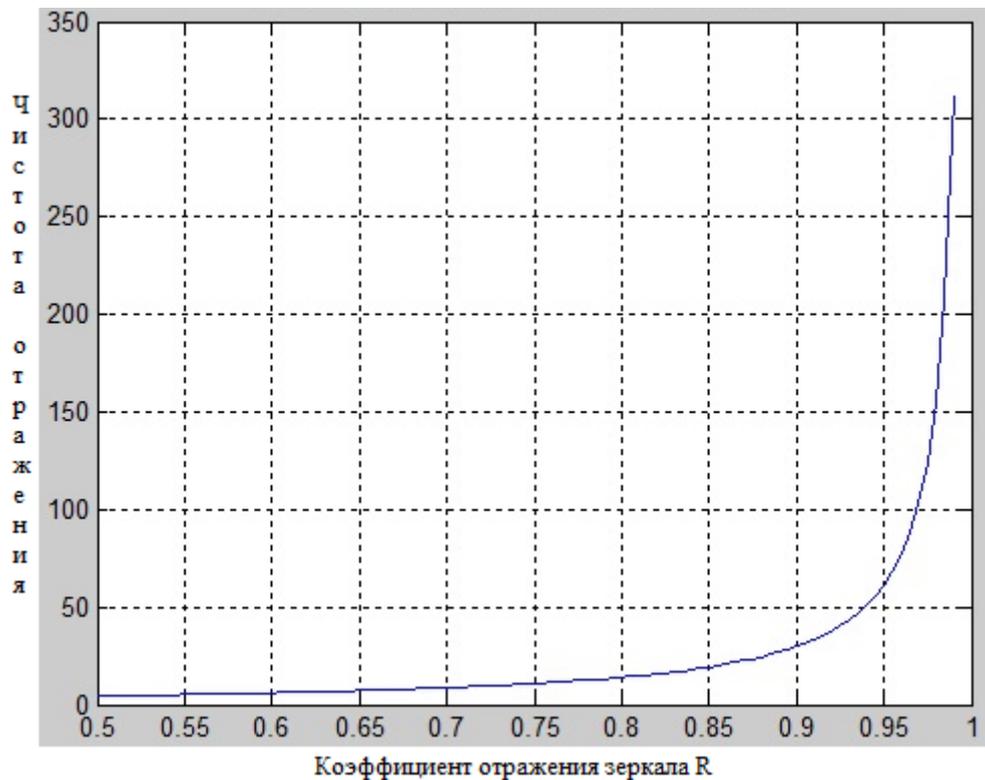


Рисунок 1 - Зависимость чистоты отражения от коэффициента отражения зеркала R

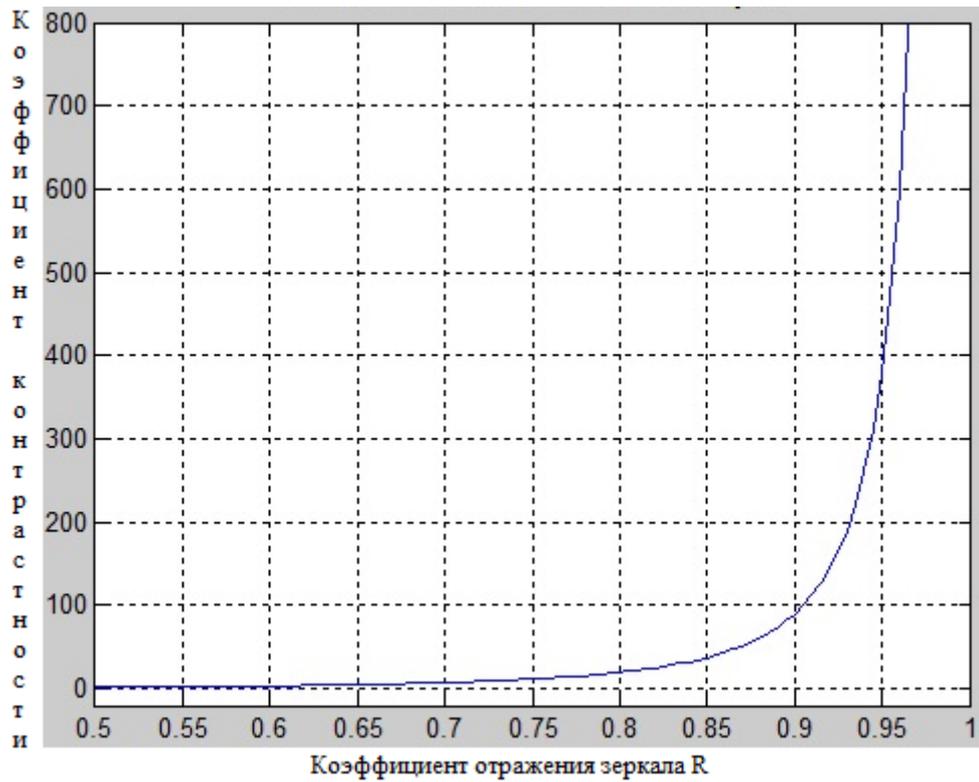


Рисунок 2 - Зависимость коэффициента контрастности от коэффициента отражения зеркала R

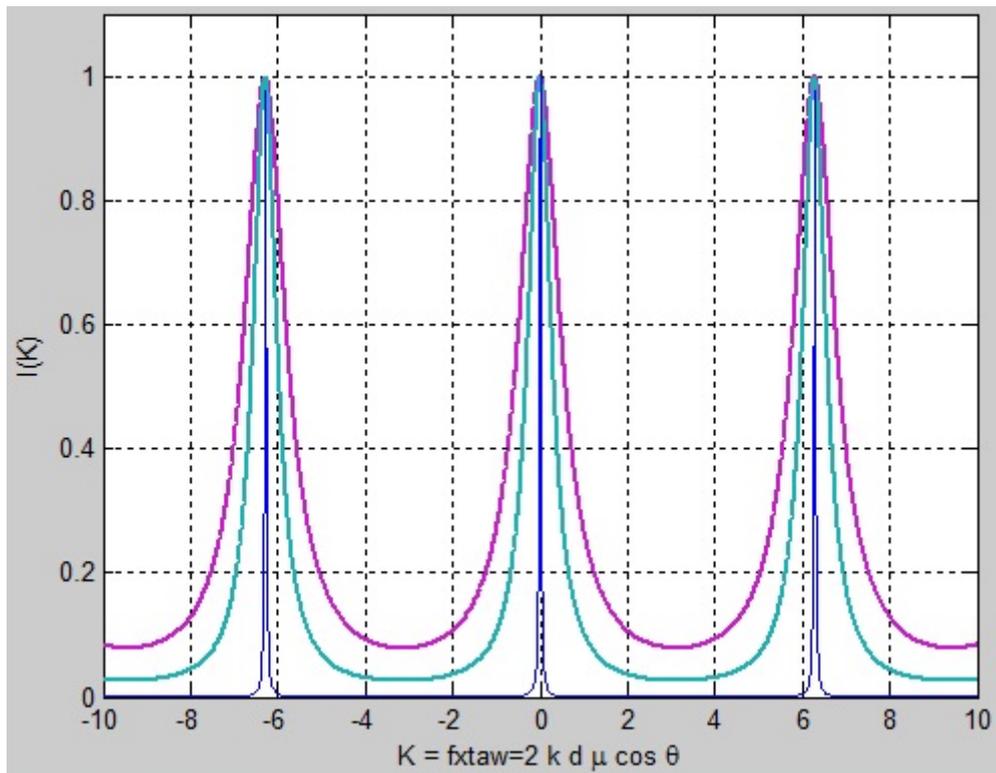


Рисунок 3 - Интенсивность излучения интерферометр после прохождения интерферометра

Моделирование механической подсистемы проводилось в программном комплексе ANSYS. В качестве объекта моделирования была выбрана подвижная масса микрооптоэлектромеханического акселерометра. На рисунке 4 представлена модель

подвижной массы, созданная в программном комплексе ANSYS. Данный программный комплекс для решения использует метод конечных элементов [5]. При моделировании использовалась эквивалентная модель подвижной массы. Входящая в состав программного комплекса утилита ROMTool позволяет представить созданный объект в виде описания на языке VHDL-AMS.

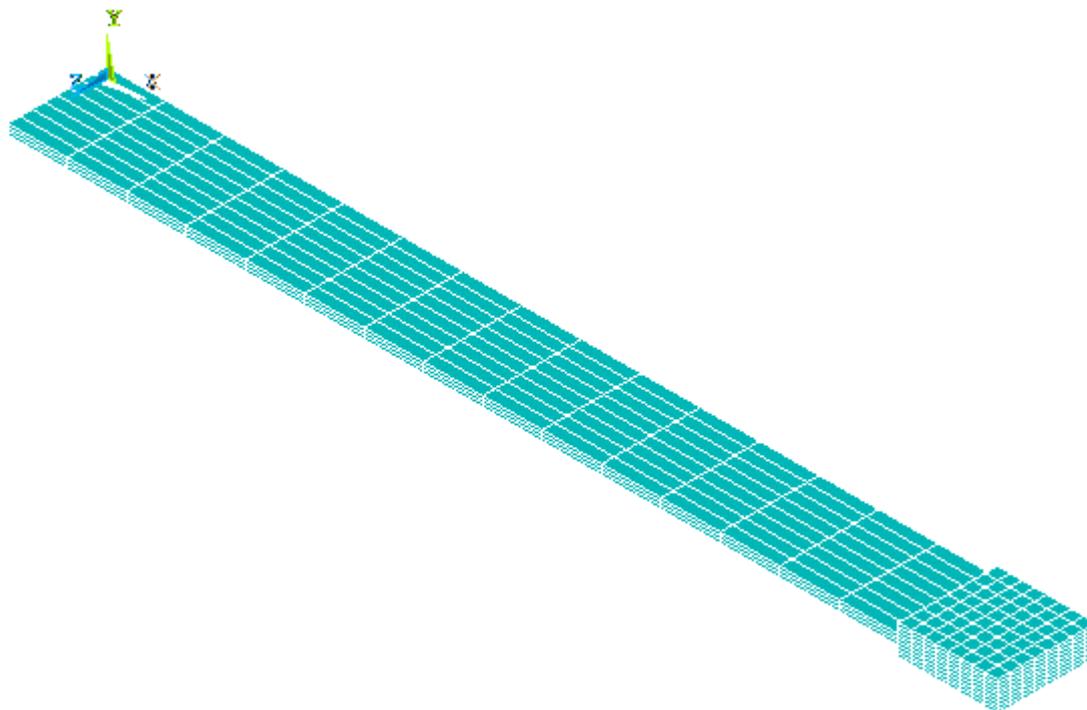


Рисунок 4 – Модель подвижной массы микрооптоэлектромеханического акселерометра

Для осуществления контроля микрооптоэлектромеханического акселерометра необходима управляющая подсистема. В ее функции входит контроль параметров микрооптоэлектромеханического акселерометра, а так же снятие, преобразование и вывод сигнала. Подсистема представляет собой матрицу светочувствительных диодов, подключенную к усилителю, а затем к модулю сбора, преобразования и вывода информации. Данная система также описывается на языке VHDL-AMS при помощи программного продукта SMASH.

Методы перехода между оптической, механической и управляющей подсистемами, с учетом иерархического подхода, приведены на рисунке 5.

Заключение

Разработка методов переходов между подсистемами различной физической природы, выявление достоинств и недостатков этих методов, а так же их применение для решения практических задач имеет большое значение при проектировании микрооптоэлектромеханических систем.

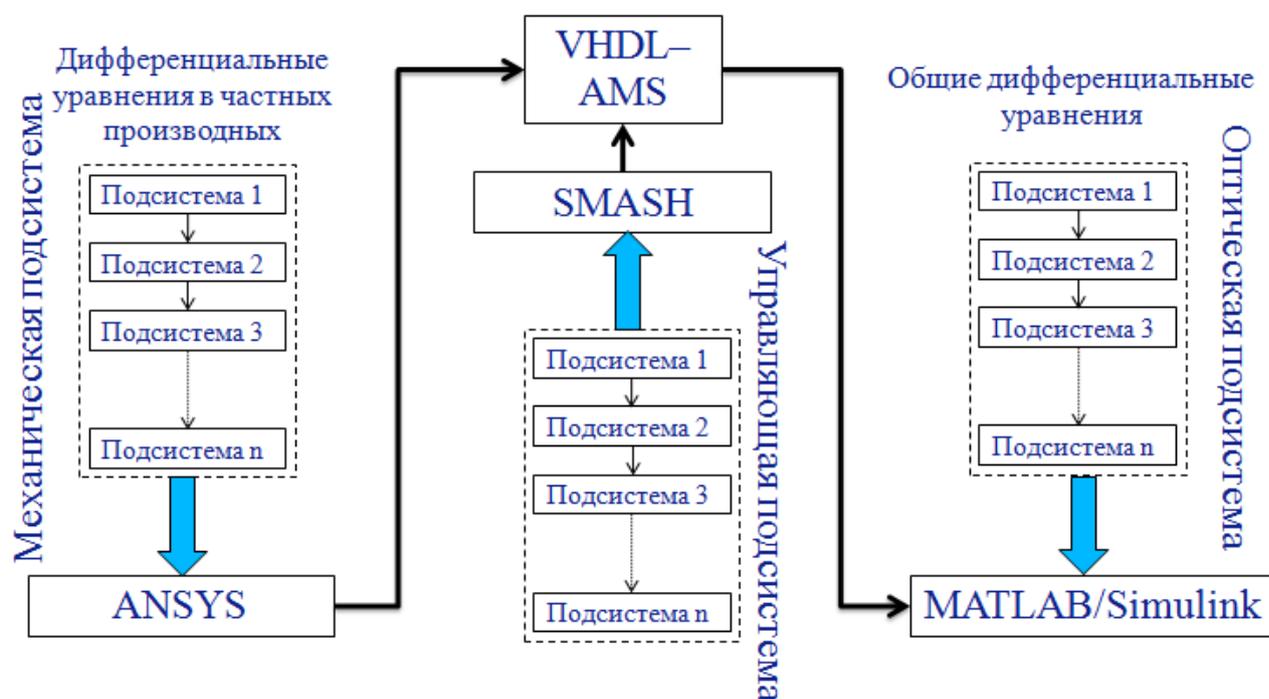


Рисунок 5 – Методы перехода между оптической, механической и управляющей подсистемами

Преимуществом использования языка VHDL-AMS является его универсальность, возможность описания смешанных аналого-цифровых систем, а так же поддержка многими программными пакетами, используемыми при моделировании микрооптоэлектромеханических систем.

Литература

1. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. — М: Наука, 1997. — 320 с.
2. Введение в математическое моделирование. Учебное пособие. Под ред. П. В. Трусова. — М.: Логос, 2004.
3. Мышкис А. Д., Элементы теории математических моделей. — 3-е изд., испр. — М.: КомКнига, 2007.
4. Косолапов И.А. Моделирование микроакселерометра на основе интерферометра Фабри-Перов САПР ANSYS, 9 молодежная международная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы». – М.:МГТУ, 2009. – С.108-111.
5. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ. — М.: Мир, 1984
6. Шахнов В.А., Зинченко Л.А. Особенности математического моделирования в задачах проектирования наносистем. Информационные технологии и вычислительные системы, №4, 2009. С. 84-92.
7. Косолапов И.А. Иерархическое многомасштабное моделирование микрооптомеханических систем, III Всероссийская школа-семинар для студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноинженерия» - Калуга : КФ МГТУ, 2010. – С.187 – 191.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 10-07-00171-а).

СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ НА БАЗЕ МЭМС ГИРОСКОПА

Антохин А. И.

Научный руководитель: к.т.н., доцент, Власов А. И.

Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана, ИУ4

STABILISATION SYSTEM BASED ON MEMS GYROSCOPE

Antokhin A. I.

Supervisor: Ph.D. Vlasov A. I.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Аннотация

В докладе представлена концепция системы стабилизации на базе МЭМС гироскопа. Рассмотрены различные типы систем стабилизации, их преимущества и недостатки, а также область применения. Обоснован выбор МЭМС гироскопа для системы стабилизации. Описаны основные принципы работы МЭМС гироскопов. Проведено сравнение характеристик аналоговых и цифровых МЭМС гироскопов, предложен ряд моделей от различных производителей. Рассмотрены сравнительные характеристики предложенных моделей гироскопов. Разработан прототип конструкции системы стабилизации. Представлены экспериментальные печатные платы для работы с МЭМС гироскопами в составе системы стабилизации.

Abstract

The report introduces the concept of the stabilization system based on MEMS gyroscope. Various types of stabilization systems, their advantages and disadvantages are described and also fields of application are given. The choice of the MEMS gyroscope for stabilization system is reasoned. The report also describes the basic principles of operation of MEMS gyroscopes. Comparison of characteristics of analog and digital MEMS gyroscopes is done. A number of models from different manufacturers are presented. The prototype version of the stabilization system is designed. Some experimental printed circuit boards to work with MEMS gyroscopes in the stabilization system are also presented.

Введение

В настоящее время широкое распространение получила компактная цифровая фото и видео техника. Качество изображения получаемого с помощью такой техники постоянно растет, и на текущий момент вплотную приблизилось к качеству изображения, получаемого с помощью профессиональной техники. Однако, задача стабилизации изображения при съемке с подвижных объектов (автомобиль, радиоуправляемые самолеты и вертолеты, съемка при ходьбе и т.д.) до сих пор не имеет решений, сопоставимых по стоимости и массогабаритным характеристикам самой технике. В данном проекте решаемой задачей является создание прототипа системы стабилизации, который может быть в дальнейшем использован для разработки полноценной системы стабилизации, удовлетворяющей требованиям компактности и низкой стоимости.

1 Классификация систем стабилизации

Существует множество видов систем стабилизации, отличающихся по принципу действия, количеству стабилизируемых осей, предельным значениям отклонений и прочим характеристикам. Рассмотрим некоторые из самых распространенных систем.

- Механические системы с противовесами (рис. 1, *a*) – для стабилизации камеры используется штанга с противовесами, на которые действует сила тяжести, всегда направленная вниз. К достоинствам можно отнести крайне простую конструкцию и высокую надежность. Однако недостатками является возможность стабилизации только относительно одной или двух осей, вероятность раскачивания штанги, отсутствие автоматического управления.

- Механические системы с гироскопами (рис. 1, б) – в качестве стабилизирующего устройства используют гироскопы с массивными металлическими дисками, вращающимися с высокой скоростью (достигают десятков тысяч оборотов в минуту). К достоинствам данных систем можно отнести высокое качество стабилизации, высокую надежность. Недостатками являются большая масса (соизмеримая с массой полезной нагрузки), высокое энергопотребление, вплоть до десятков ватт, а также крайне высокую стоимость в связи высочайшим требованиям к качеству дисков и двигателей.
- Оптические системы (рис. 1, в) – стабилизация происходит путем введения подвижного элемента в оптическую систему. Как правило, такие системы имеют крайне низкий предел максимального отклонения (единицы градусов). Обладают высокой компактностью, за счет небольших размеров подвижного элемента. Могут использоваться в сочетании с другими системами стабилизации.
- Электромеханические системы (рис. 1, г) – в данном виде систем, поворот камеры осуществляется электродвигателями, как правило, управляемых микропроцессором. Угол отклонения может определяться гироскопами различных типов. К достоинствам таких систем можно отнести компактность, а также гибкость настройки, возможность автоматического управления. К недостаткам относится высокая сложность систем.

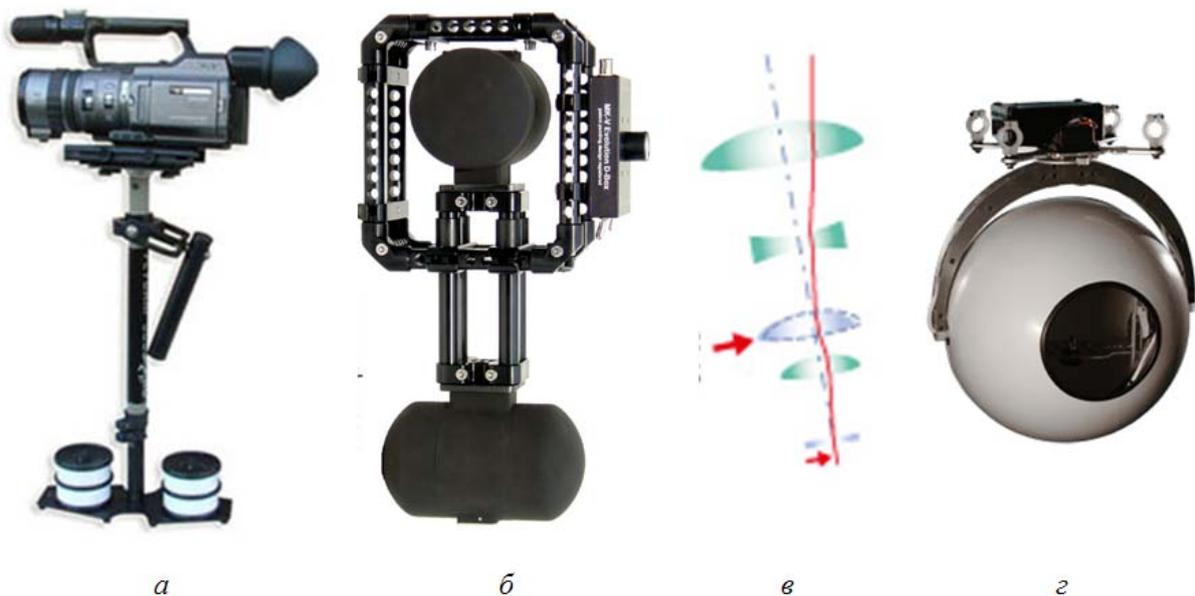


Рисунок 1 – Некоторые виды систем стабилизации

Разрабатываемый прототип системы стабилизации можно отнести к электромеханической системе, в которой в качестве чувствительного элемента используется МЭМС гироскоп. Данный тип системы стабилизации выбран как оптимальный для решения поставленной задачи, ввиду наибольшей гибкости системы при сравнительно компактных размерах и низкой стоимости.

2 МЭМС гироскопы

Микроэлектромеханические Системы (МЭМС) – технологии и устройства, объединяющие в себе микроэлектронные и микромеханические компоненты. Область применения МЭМС технологии крайне широка. Данная технология используется для создания на подложке кремния таких приборов как акселерометр, гироскоп, микрофон, магнитометр и прочих устройств, требующих наличия механических элементов. Получаемые устройства в

большинстве случаев имеют линейные размеры меньше 1 мм, что открывает новые возможности для современной науки и техники.

Одним из видов МЭМС микросхем являются гироскопы, позволяющие определять скорость вращения устройства вокруг одной или нескольких осей. Преимуществом этих гироскопов перед гироскопами другого типа состоит в компактности, вплоть до моделей размером 4x4x1 мм [1] и низкой рыночной стоимости (от 3\$ за единицу).

МЭМС гироскопы относятся к вибрационным гироскопам. Принцип действия состоит в отклонении постоянно колеблющегося грузика, во время вращения, под действием силы Кориолиса. Данное отклонение определяется за счет изменения электрической емкости между грузиком и специальными пластинами, что фиксируется специальной электрической схемой, которая выдает напряжение, пропорциональное величине отклонения грузика. На рисунке 2 представлено изображение с микроскопа, показывающее внутреннюю структуру МЭМС гироскопа L3G4200D [2].

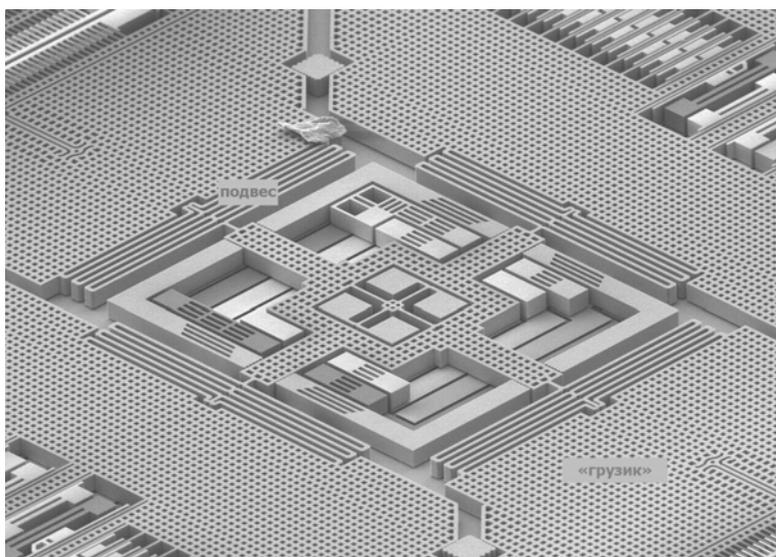


Рисунок 2 – Устройство гироскопа L3G4200D

Существуют аналоговые и цифровые МЭМС гироскопы. Выходной сигнал аналоговых гироскопов представляет собой напряжение, пропорционально изменяющееся в зависимости от скорости вращения, причем при вращении в одну сторону напряжение увеличивается, а при вращении в другую сторону, наоборот, уменьшается. Данные гироскопы требуют подключения аналого-цифровой преобразователь АЦП для совместного использования с микропроцессором. Принцип действия цифровых гироскопов аналогичен, однако АЦП встроен непосредственно в микросхему, а данные могут считываться через различные цифровые интерфейсы, что значительно улучшает качество сигнала, за счет сокращения помех, наведенных на аналоговую линию между датчиком и АЦП. Различные модели гироскопов могут определять вращение вокруг разного количества осей, от одной до трех.

На сегодняшний день основными производителями МЭМС гироскопов являются две фирмы - ST Microelectronics и Analog Devices. На рис. 3 представлен внешний вид самой последней модели цифрового гироскопа L3G4200D от ST Microelectronics. Наиболее схожим по характеристикам аналогом является гироскоп ADXRS450 от Analog Devices.

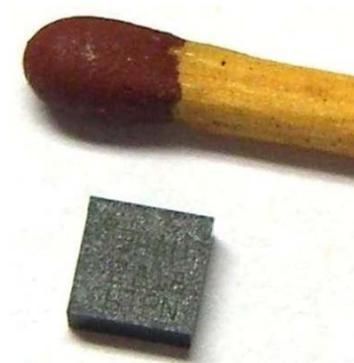


Рисунок 3 – Внешний вид гироскопа L3G4200D

Современные МЭМС гироскопы позволяют добиться точности ухода от нулевого положения в пределах 5° - 25° в час [3], что является удовлетворительной характеристикой для разрабатываемой системы стабилизации. Кроме того, тенденции таковы, что в течение нескольких лет эта характеристика может сильно улучшиться. При этом габариты, стоимость и энергопотребление МЭМС гироскопов не имеют себе равных среди других типов гироскопов.

3 Система стабилизации на базе МЭМС гироскопа

Принцип действия системы стабилизации состоит в постоянном опросе цифрового МЭМС гироскопа, для получения значения текущей угловой скорости и придание такой же скорости механизму подвески, однако в противоположном направлении, чтобы компенсировать вращение камеры. Упрощенная модель прототипа системы представлена на рис. 4.

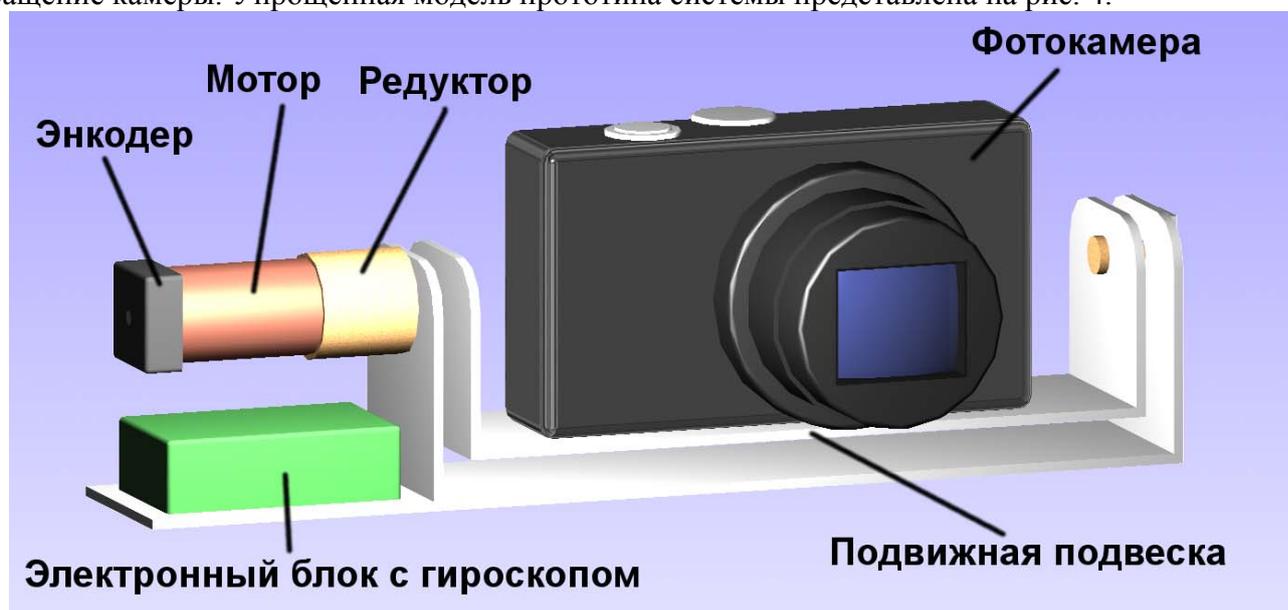


Рисунок 4 – Модель прототипа системы стабилизации

Для получения информации о текущем положении подвески используется энкодер, установленный на вал электродвигателя. Данный прототип рассчитан на стабилизацию только по одной оси, однако в дальнейшем система может быть расширена до двух или трех осей стабилизации, что позволит исключить нежелательные движения камеры при любом повороте основания системы стабилизации. В качестве микроконтроллера обеспечивающего работу системы планируется использовать микроконтроллер серии AVR XMEGA работающий на тактовой частоте 32 МГц.

4 Практическая реализация

На первом этапе практической реализации были разработаны печатные платы для подключения МЭМС гироскопов к микроконтроллеру, для определения типа и конкретной модели гироскопа, подходящего для работы в системе стабилизации. Результатом разработки явились две платы, с аналоговым гироскопом LPR530AL [4] (рис. 5, а) и цифровым гироскопом L3G4200D (рис. 5, б).

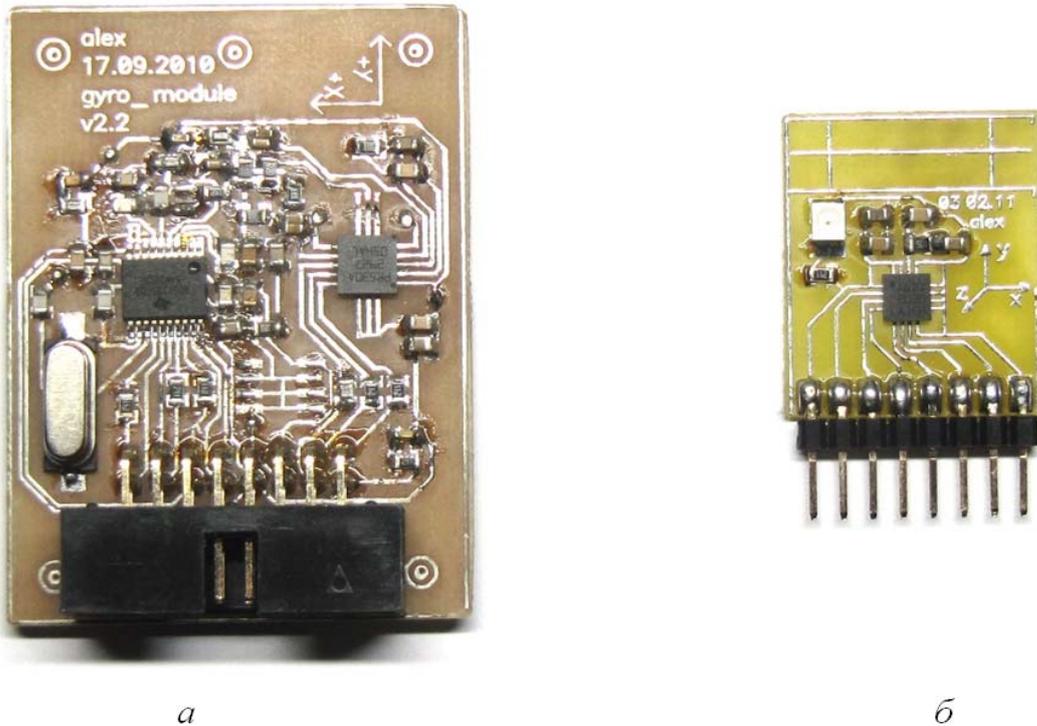


Рисунок 5 – Печатные платы для тестирования гироскопов

Как видно, аналоговый гироскоп требует множество дополнительных внешних компонентов для работы, в отличие от цифрового гироскопа. Кроме того, полученные с цифрового гироскопа данные оказались более точными. Таким образом, для дальнейшей разработки был выбран цифровой гироскоп L3G4200D.

Литература

1. ST Microelectronics, L3G4200D [электронный ресурс <http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/17116.pdf>], проверено 05.02.2011 в 0.45.
2. Алексей Дрожжин, MEMS: микроэлектромеханические системы, [электронный ресурс <http://www.3dnews.ru/editorial/MEMS-microelectromechanical-systems-Part-1>], проверено 05.02.2011 в 0.50.
3. Analog Devices, ADXRS450 [электронный ресурс <http://www.analog.com/en/mems/gyroscopes/adxrs450/products/product.html?ref=ASC-PR-401>], проверено 05.02.2011 в 0.45.
4. ST Microelectronics, LPR530AL [электронный ресурс <http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/15812.pdf>], проверено 05.02.2011 в 0.55

МОДЕЛЬ ДВУМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА В ПАКЕТЕ MPB

Новиков П., Калинин Ю., Махиянов И, Зваев В.
Научный руководитель: к.т.н., доцент, Власов А. И.
Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИУ4

COMPUTING THE BAND STRUCTURE FOR A TWO-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL USING THE MPB

Novikov P., Kalinin Y., Makhianov I, Zvaev V.
Ph.D., associate professor, Vlasov A.I.
Russia, Moscow, Bauman MSTU, IU4

Аннотация

В данной работе рассмотрены возможности пакета MIT Photonic-Bands по расчету зонной структуры и вывода полей двухмерного фотонного кристалла. Также даются базовые представления о том, как работает пакет и о некоторых его возможностях.

Annotation

In this scientific work has been considered the capabilities of MIT Photonic-Bands on the calculation of band structure and the output fields of two-dimensional photonic crystal. Also has been considered a basic understanding of how the package works and some of its capabilities.

Введение

Все использование пакета Photonic-Band строится на основе управляющего файла, сокращенно "ctl" и обычно имеет имя наподобие foo.ctl (хотя возможно использование любое расширения файла). Управляющий файл определяет геометрию, количество собственных векторов для расчета, выводимую информацию и другие специфические параметры вашего расчета ([1]). Ctl файл написан на скриптовом языке, что означает, что его содержание может быть очень различным – от простой последовательности команд, устанавливающих геометрию и другие параметры, до законченных программ с вводом данных от пользователя, циклами и любыми другими средствами и многим другим.

Чтобы разобраться с языком нет необходимости иметь глубокие познания в программировании. Порог вхождения в язык низок, как и у всех скриптовых языков.

Управляющий файл обычно реализуется на основе библиотеки libctl, набора утилит, которые, в свою очередь, основаны на Scheme language. Итак, есть три источника возможных команд и синтаксиса ctl файла:

- [Scheme](#), функциональный язык программирования, один из двух наиболее популярных в наши дни диалектов языка Лисп ([2]), разработанный MIT, отличающийся чрезвычайно простым синтаксисом: все выражения имеют вид: (название_функции аргумент1, аргумент2, ...).

В данной работе используется Scheme под интерпретатором GNU Guile (разработанный, чтобы встраиваться в программы в виде скриптового расширяемого языка).

- Libctl – библиотека, которая служит, чтобы упростить процесс передачи информации между Scheme и научно-вычислительным ПО.
- Пакет MIT Photonic-Bands, который определяет все особенности интерфейса, являющиеся особыми для расчетов фотонной зонной структуры.

Программа MPB вызывается с помощью команды типа: `unix% mpb foo.ctl >& foo.out`, которая считывает управляющий файл foo.ctl и выполняет его, сохраняя результат в файл foo.out. Однако, если вы запустите mpb без параметров, вы попадете в интерактивный режим, в котором можете набирать команды и тут же видеть результат их выполнения.

1. Расчет зонной структуры

Для примера просчитаем зонную структуру диэлектрических стержней в воздухе в виде двухмерной квадратной решетки. В контрольном файле сначала следует указать параметры геометрии и моделирования, а затем запустить программу и получить обработанные данные. Все параметры (каждый из которых согласован с переменными Scheme) имеют значения по умолчанию, так что требуется определить только те параметры, которые будут отличны от заранее установленных. Один из них, num-bands задает, какое количество зон (собственных состояний) высчитываются в каждой K-той точке. Если не задать num-bands в консоли, то оно будет равно 1, что слишком мало; надо задать большую величину:

```
(set! num-bands 8)
```

Так следует менять значения величин в Scheme. Следующим пунктом (хотя на самом деле, порядок не имеет особого значения) является установка k-точек (волновые вектора Блоха), в которых необходимо вычислять зоны. Их задает параметр k-points, таблица из 3 векторов, которые вначале пусты). Устанавливаем их в углах минимальной зоны Brillouin квадратной решетки, Gamma, X, M и Gamma:

```
(set! k-points (list (vector3 0 0 0)      ; Gamma
                    (vector3 0.5 0 0)    ; X
                    (vector3 0.5 0.5 0)  ; M
                    (vector3 0 0 0)))    ; Gamma
```

Следует отметить, как определяются три вектора, что можно разбивать строку на несколько линий и что точка с запятой (;) указывает на начало комментария. Обычно требуется высчитать зоны во множестве промежуточных точек, чтобы видеть непрерывную зонную структуру. Но вместо того, чтобы вручную указывать все эти промежуточные точки, можно воспользоваться одной из функций, предоставляемой libctl, чтобы интерполировать их значения:

```
(set! k-points (interpolate 4 k-points))
```

Данная функция берет k-точки и линейно интерполирует 4 новые между каждой парой следующих друг за другом точек. Если теперь набрать k-points в окне консоли, то выведутся все 16 точек в новом списке:

```
(#(0 0 0) #(0.1 0.0 0.0) #(0.2 0.0 0.0) #(0.3 0.0 0.0) #(0.4 0.0
0.0) #(0.5 0 0) #(0.5 0.1 0.0) #(0.5 0.2 0.0) #(0.5 0.3 0.0) #(0.5
0.4 0.0) #(0.5 0.5 0) #(0.4 0.4 0.0) #(0.3 0.3 0.0) #(0.2 0.2 0.0)
#(0.1 0.1 0.0) #(0 0 0))
```

Как будет показано ниже, все пространственные вектора в программе задаются в базисе направлений решетки, нормированных к длинам basis-size (по умолчанию это единичный вектор), в то время как k-точки задаются в базисе (ненормированных) обратных векторов решетки. В этом случае, не надо указывать направления решетки, так как величины по умолчанию приемлемы – вектора решетки связаны с декартовыми единичными осями.

Теперь нужно установить геометрию системы – для этого требуется определить, какие объекты будут расположены в примитивной ячейке решетки, центрированные к началу координат. Это контролируется переменной geometry, которая представляет собой список геометрических объектов. Объекты создаются операторами формы:

```
(make type (property1 value1) (property2 value2) ...)
```

Существуют различные виды (подклассы) геометрических объектов: цилиндры, сферы, блоки, эллипсоиды, а в будущем, возможно, появятся и другие. Сейчас требуется получить квадратную решетку из стержней, так что один диэлектрический цилиндр будет помещен в начало в начало:

```
(set! geometry (list (make cylinder
(center 0 0 0) (radius 0.2) (height infinity)
(material (make dielectric (epsilon 12))))))
```

В приведенном листинге задаются несколько параметров цилиндра: center – начало координат, radius его 0.2 а height (длина вдоль оси) = infinity. Другое свойство, material, само по себе является объектом. Он задается как диэлектрик с указанием, что epsilon = 12. Есть еще одно свойство у цилиндра, которое можно указать - это направления его осей, но в данном случае оставляется стандартное значение направления совпадающее по направлению с осью Z.

Все геометрические объекты якобы трехмерны, но так как мы проводим двумерное моделирование, единственное, что имеет значение, это пересечение с плоскостью xy ($z=0$).

Установим размерность системы. Обычно это делается, когда устанавливается размер высчитываемой ячейки, то есть задавая переменную geometry-lattice, которая является объектом класса lattice: можно установить несколько размеров, чтобы получить размер по-size, который понижает размерность системы.

```
(set! geometry-lattice (make lattice (size 1 1 no-size)))
```

В данном примере задается двумерная ячейка с размерами 1x1 (по умолчанию квадратную). Эта ячейка дискретизирована в соответствие с переменной resolution, которая по умолчанию равна 10. Так как это меньшая сторона, а проводить надо лишь двумерный расчет, давайте увеличим разрешение:

```
(set! resolution 32)
```

В результате получается вычисляемая ячейка размерами 32x32. Для эффективного расчета лучше сделать решетку с размером, кратным 2, или разложить по меньшим степеням (таким как 2,3,5 и 7). На практике надо устанавливать разрешение, по меньшей мере, равное 8, чтобы получить требуемую точность.

На этом задание параметров закончено. Их еще множество, однако в данном случае будут использоваться их стандартные значения. Теперь все готово чтобы начать вычислять зонную структуру. Самый простой способ - набрать(run). Однако, так как проводится двумерный расчет, необходимо разложить зоны на TE и TM-поляризованные типы. Это осуществляется выполнением (run-te) и (run-tm).

Результирующий файл окажется довольно большим, досконально показывая, что делает код во время выполнения. Большая часть содержания этого файла проста для анализа, однако следует обратить особое внимание на один аспект. Среди вывода вам должны попасться такие строчки:

```
tefreqs:, 13, 0.3, 0.3, 0, 0.424264, 0.372604, 0.540287, 0.644083,
0.81406, 0.828135, 0.890673, 1.01328, 1.1124
```

Эти строчки предназначены для того, чтобы с легкостью извлечь информацию о зонной структуре и импортировать ее в таблицу для графического анализа. Они содержат указатели на k-точки, компоненты и магнитуды k, а также частоты зон в формате с разделяющими запятыми. Каждая строка снабжается приставкой "tefreqs" для TE зон, "tmfreqs" для TM зон, и "freqs" для остальных зон (получаемых командой (run)), и используя эти префиксы, можно

извлечь нужные данные из выходного файла, через программу подобную `grep`. Например, если изменился выходной файл на `foo.out` (как говорилось ранее), можно извлечь ТМ зоны, выполнив `tmfreqs foo.out` в консоли Unix. Отметим, что выходной файл включает так же и строку заголовка:

```
tmfreqs: , k index, kx, ky, kz, kmag/2pi, band 1, band 2, band 3,
band 4, band 5, band 6, band 7, band 8
```

поясняющую каждый столбец данных. Другой вид вывода командой `run` показывает список запрещённых зон, замеченных при расчете зон. Например, вывод командой (`run-tm`) включает следующие строки

```
Gap from band 1 (0.282623311147724) to band 2 (0.419334798706834),
38.9514660888911%
Gap from band 4 (0.715673834754345) to band 5 (0.743682920649084),
3.8385522650349%
```

Эти данные также хранятся в переменной `gap-list`, которая является списком вида (*gap-percent gap-min gap-max*).

Итак, зонную структуру рассчитана и получены собственные частоты для каждой k -той точки. Если необходимо посмотреть, как выглядят зоны и проверить правильность диэлектрической функции, то необходимо вывести HDF файлы (HDF – это двоичный формат для многомерных научных данных, который может быть прочитан многими программами визуализации).

Когда запускается одна из функций `run`, диэлектрическая функция в элементарной ячейке записывается в файл `"epsilon.h5"`. Чтобы вывести поля и другую информацию, нужно добавить аргументы к функции `run`. Пример:

```
(run-tm output-efield-z)
(run-te (output-at-kpoint (vector3 0.5 0 0) output-hfield-z
output-dpwr))
```

Выведет электрическое (E) поле Z компонентов (?) для ТМ зон во всех k -точках; а также магнитное (M) поле z компонентов и плотность энергии электрического поля (D power) для ТЕ зон только в точке X.

Выводы

Пакет MIT Photonic-Bands успешно справился с расчетом зонной структуры фотонного кристалла. Была создана методика составления Ctl файла для расчетов кристаллов, а также на примере был проведен расчет.

Литература

1. http://ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/MPB_manual - руководство по MIT Photonic-Bands.
2. <http://www.scheme.com/tspl3/> - руководство по Scheme.
3. Г. А. Миронова. Зонная структура электронного энергетического спектра в твердых телах. Модели свободных и сильно связанных электронов // Весник физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова, 2001 г.
3. С.Я. Ветров, И.В. Тимофеев, Н.В. Рудакова "Зонная структура резонансного фотонного кристалла //Физика твердого тела. – 2001. №1.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы ГК №02.740.11.0013.

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ТРАНСФОРМАЦИИ ТОПОЛОГИЙ СУБМИКРОННЫХ СБИС ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ДВОЙНОГО ФОТОШАБЛОНА

Аверьянихин А.Е.

Научный руководитель: д.т.н., проф. Зинченко Л.А.

Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИУ4

FEATURES OF REALIZATION OF SUBMICRONIC CIRCUITS TOPOLOGY TRANSFORMATION ALGORITHM FOR DOUBLE PATTERN LITHOGRAPHY

Averjanihin A.E.

Dr., professor Zinchenko L.A.

Russia, Moscow, Bauman MSTU, IU4

Аннотация

В статье рассматриваются возможные подходы к решению задачи трансформации топологии субмикронных СБИС для технологии двойного фотошаблона.

Annotation

In article possible approaches to the decision of a problem of transformation of topology submicronic circuits for technology of a double pattern lithography are considered.

Введение

В настоящее время современная полупроводниковая промышленность развивается в сторону уменьшения топологических размеров элементов, последовательно осваивая технологические нормы изготовления элементов с критическими размерами 90,65,45 нм [1]. Тенденция размещения большего количества элементов на единице площади отвечает стремлениям производителей к микроминиатюаризации элементной базы электронной промышленности и созданию более сложных вычислительных устройств.

Однако с уменьшением технологических норм производства элементов топологии связаны определенные проблемы. Среди них и проблема эффективного теплоотвода, а так же возрастающая сложность производства элементной базы, связанная с негативным влиянием фундаментальных ограничений [2]. Примером таких ограничений может служить реализация эффекта оптический близости контуров элементов топологии, что приводит к их искажению при экспонировании из-за негативного влияния эффекта взаимной диффракции.

Таким образом, уменьшение критических размеров топологии СБИС приводит к все возрастающему влиянию фундаментального противоречия [4] между стремлением производителей к микроминиатюаризации элементной базы, и возрастающей сложностью производства элементов, отвечающим современным требованиям. По мнению ряда крупнейших аналитиков, предел классической КМОП технологии будет достигнут при приближении проектных норм к отметке 18 нм и менее. В этих условиях актуальной становится задача усовершенствования способов производства элементной базы для обеспечения возможности топологического воспроизводства элементной базы нового поколения [5].

Среди таких методов можно отметить:

- Изменение характеристик облучающего воздействия в процессе проекционной фотолитографии, например уменьшение длины волны или переход в область глубокого ультрафиолета;
- Изменение оптических характеристик среды экспонирования, например иммерсионная фотолитография;
- Математическое моделирование сложных фотошаблонов, которые при экспонировании в конкретных условиях реализации оптических эффектов

близости дадут необходимый отпечаток элемента топологии, например фазосдвигающие фотошаблоны.

- Разделение слоя топологии с высокой плотностью расположения элементов на два слоя с меньшей плотностью расположения элементов и их последовательное экспонирование – технология двойного фотошаблона.

В работах [3, 5] описываются теоретические вопросы реализации декомпозиции топологии субмикронных СБИС для технологии двойного фотошаблона. Рассмотрим более подробно аспекты реализации алгоритмов трансформации топологии и представления топологической информации.

1. Постановка задачи трансформации топологии субмикронных СБИС для технологии двойного фотошаблона

Современная СБИС содержит множество элементов, производство которых выполняется, как правило, поэтапно в процессе проекционной фотолитографии. Сложность современной СБИС создает необходимость применения систем автоматизированного проектирования в подготовке проекта СБИС, сохранению данного проекта и передаче его в программно-аппаратный комплекс для воспроизводства. Таким образом, проект современной СБИС представляет собой файл специального формата. На сегодняшний момент существует несколько распространенных форматов файлов топологии, отличающихся между собой способом описания геометрических примитивов слоя топологии, взаимосвязей между ними, а так же, возможно, применением средств уменьшения энтропии символьного потока.

Распространенными форматами описания топологии являются GDS, OASIS и ряд других. Для решения задачи трансформации топологии необходимо иметь аппарат представления элементов топологии в виде связанных структур, таким образом, задача разделения слоев не является тривиальной. Необходимо обеспечить чтение топологической информации из файла определенного формата, и представление данной информации в памяти вычислительной системы таким образом, что бы не прибегать к избыточному использованию ресурсов, так как размеры файлов топологии современных СБИС могут достигать сотен гигабайт, что, конечно, накладывает ограничения на возможности их математической обработки на вычислительных системах класса IBM-PC совместимого персонального компьютера.

В данной статье рассматривается следующая формулировка задачи трансформации топологии субмикронных СБИС для технологии двойного шаблона.

Для заданного множества геометрических объектов $GeO = \{GeO_1, GeO_2, \dots, GeO_n\}$, представляющих собой заданную топологию СБИС, необходимо найти такое решение, чтобы были выполнены следующие ограничения:

$$d(GeO_i, GeO_j) \geq d_{dr}(GeO_i, GeO_j), \quad (1)$$

$$d(GeO_i, GeO_j) \geq d_{dp}(GeO_i, GeO_j), \quad (2)$$

где $d(GeO_i, GeO_j)$ – расстояние между геометрическими объектами GeO_i и GeO_j после трансформации топологии по оси K , $K=\{X, Y\}$;

$d_{dr}(GeO_i, GeO_j)$ - минимально допустимые расстояния между геометрическими объектами GeO_i и GeO_j согласно конструкторско-технологическим ограничениям;

$d_{dp}(GeO_i, GeO_j)$ - минимально допустимое расстояние между геометрическими объектами, лежащими в одном слое, допускающее воспроизведение этих геометрических объектов в одном слое;

$i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n.$

При этом полагается, что множество геометрических объектов $GeO = \{GeO_1, GeO_2, \dots, GeO_n\}$ упорядочено по слоям, затем по координате X и затем по координате Y левого нижнего угла каждого геометрического объекта.

2. Особенности реализации алгоритма раскраски графа

В работе [6] предложены алгоритмы трансформации топологии субмикронных СБИС по технологии двойного фотошаблона. Однако реализация описанных алгоритмов требует определенной организации представления топологической информации. Это в первую очередь связано с большим объемом входной информации, а так же с необходимостью адаптации топологической информации для применения методов ее обработки.

В статье рассматриваются особенности реализации алгоритма раскраски графа противоречий, так как анализ расстояния между контурами геометрических примитивов имеет смысл проводить только в том случае, если исходная топология слоя может быть модифицирована путем разделения на два подслоя без потери целостности, а так же может быть восстановлена в первоначальном виде операцией объединения слоев. Для проверки делимости топологии используется алгоритм раскраски графов.

Математическая постановка задачи раскраски графа заключается в нахождении минимального числа цветов, в которые можно раскрасить вершины графа так, что бы концы любого ребра имели разные цвета. Мера минимального количества цветов, в которое может быть раскрашен граф – хроматическое число. Под хроматическим числом графа понимают минимальное число k , такое что множество V вершин графа можно разбить на k непересекающихся классов :

$$V = \bigcup_i C_i; C_i \cap C_j = \emptyset, \quad (3)$$

Для раскраски графов выбран последовательный алгоритм раскраски графов. Перечислим его основные этапы.

На первом этапе выполняется сортировка вершин в порядке убывания степеней вершин. Вершине с максимальным числом связей присваивается цвет $k=1$. Он будет называться текущим цветом для данной итерации цикла.

На втором этапе, неокрашенные вершины просматриваются в порядке возрастания номера, полученного в порядке сортировки. Вершины, смежные с одной из окрашенных в текущий цвет, не могут быть раскрашены в этот цвет. В текущий цвет раскрашивается всякая вершина, не смежная с другой, уже окрашенной в этот цвет. После рассмотрения всех вершин номер цвета увеличивается на единицу и второй этап повторяется.

Для уменьшения вычислительных затрат в статье предложен модифицированный алгоритм раскраски графа, ориентированный на применение в задачах трансформации топологии СБИС для технологии двойного шаблона (рис. 1).

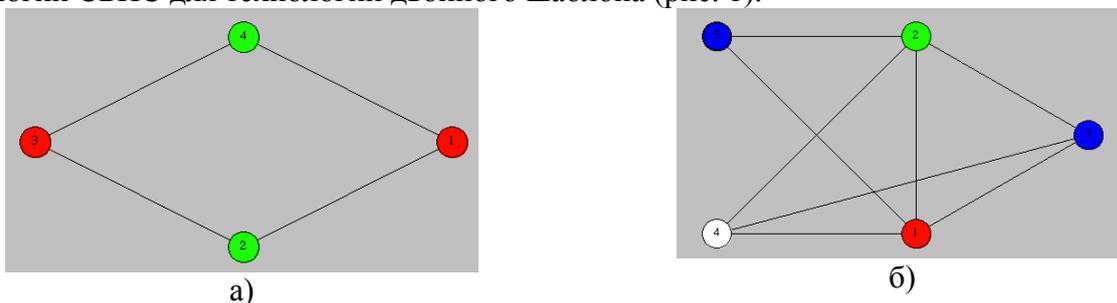


Рисунок 1 – Пример работы модифицированного последовательного алгоритма раскраски графа (а – граф двухцветный, трансформация топологии возможна; б – граф недвухцветный, трансформация невозможна)

В предложенном алгоритме выполняются первый и второй этапы, однако раскраска графа продолжается до тех пор, пока не будет использовано более двух цветов. В этом случае процедура раскраски графа завершается и сообщается, что заданная топология не может быть обработана. Если в процессе раскраски графа используется не более двух цветов,

процедура раскраски графа завершается успешно, присвоив каждой вершине один из двух цветов. В этом случае происходит запуск процедуры трансформации анализируемой топологии.

После завершения процедуры трансформации топологии результат обработки сохраняется в исходном формате в виде файла с большим количеством слоев по сравнению с исходным.

3. Структура программного обеспечения TPLConeverter

Для выполнения операций с топологией СБИС используются списочные модели [6]. Конечная модель представляет собой иерархическую структуру, таким образом, конечную модель можно хранить в оперативной памяти и производить необходимую обработку.

Для представления описанной структуры, а так же для выполнения необходимых операций над ее элементами, разработаны специальные классы и методы. На рис. 2 приведена диаграмма классов программного обеспечения TPLConeverter. Для формирования графов применяется списочный метод, реализуемый на базе класса `ap_impl`, он имеет процедуры и методы для описания вершин графа, связей между вершинами в виде связанных списков, а так же выполнения элементарных операций.

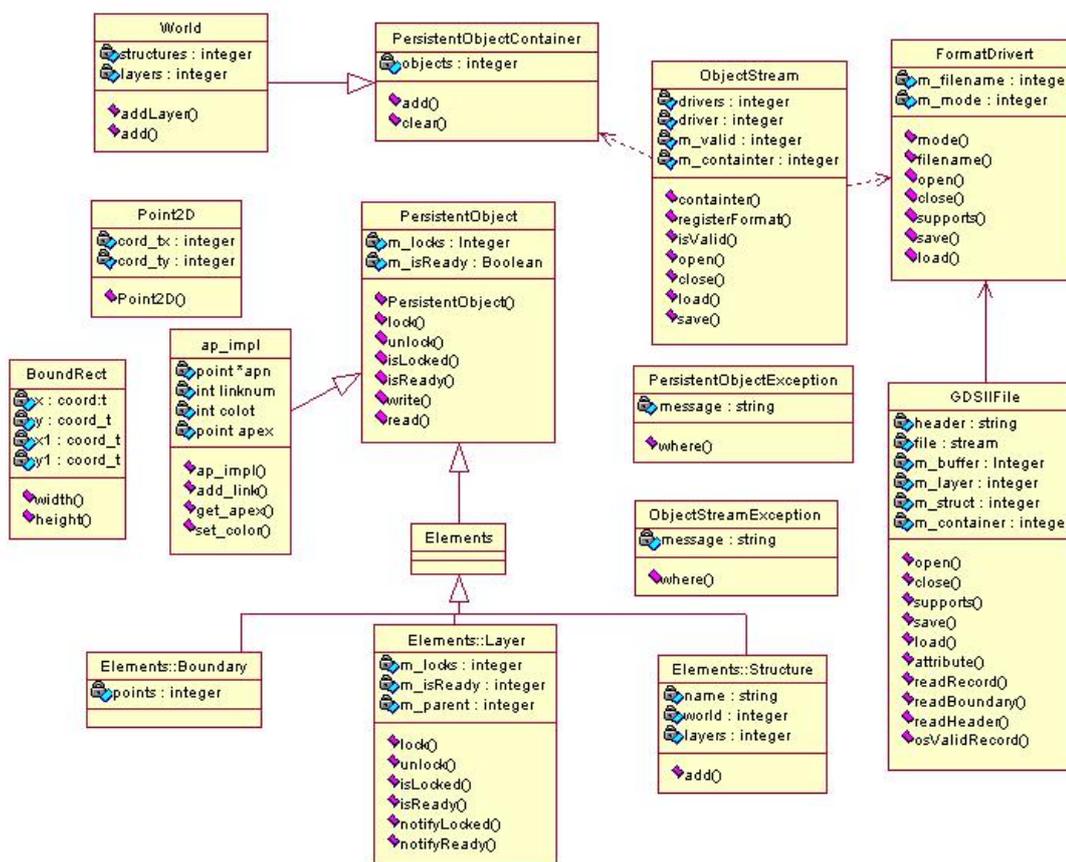


Рисунок 2 – Диаграмма классов программного обеспечения трансформации топологии СБИС

Для каждого элемента структуры выделен определенный класс с множеством элементарных методов, применимых к структуре. Обработка элементов заключается в их последовательном переборе, анализе расстояний между контурами геометрических примитивов на предмет удовлетворения заданному критерию. Если расстояние между контурами геометрических примитивов не удовлетворяет заданному критерию, производится разделение анализируемых примитивов на два различных слоя топологии.

Заключение

В статье рассмотрены возможные подходы к решению задачи трансформации топологии субмикронных СБИС для технологии двойного шаблона. Рассмотрен алгоритм раскраски графа для проведения анализа топологии на предмет возможности трансформации для технологии двойного фотошаблона. Приведена разработанная диаграмма классов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы» (ГК №П2292), а так же гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущей научной школы Российской Федерации НШ-3483.2010.9.

Литература

1. Moore G. Cramming More Components Onto Integrated Circuits Gordon Moore // Electronics. – 1965, №8.
2. Немудров В., Мартин Г. Системы-на-кристалле. Проектирование и развитие.- М.: Техносфера, 2004.- 212 с.
3. Аверьянихин А.Е. Разработка алгоритма трансформации маски для фотолитографии по технологии двойного фотошаблона // Сборник трудов второй всероссийской школы — семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению нанотехнологий. - Москва.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.
4. Ревенков А.В., Резчикова Е.В. Теория и практика решения технических задач. 2-е изд. испр. и доп. М.: Форум, 2009.
5. Аверьянихин А.Е. Особенности описания топологий субмикронных СБИС по технологии двойного фотошаблона в САПР СБИС // Сборник трудов 12 молодежной международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2010» - Москва.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.
6. Зинченко Л.А., Резчикова Е.В., Аверьянихин А.Е. Алгоритмы трансформации топологии субмикронных СБИС // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана - Москва.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.

МАКРОМОДЕЛИ МИКРООПТОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Акбашев Д. А.

Научный руководитель: профессор, д.т.н., Зинченко Л.А.
МГТУ им. Баумана, Москва, РФ

REDUCED ORDER MODELS OF MICROOPTOMECHANICAL SYSTEMS

Akbashev D.A.

Research Advisor: Professor, Dr. Zinchenko L.A.
Moscow Bauman Technical University, Moscow, RF

Аннотация

Проведен сравнительный анализ методов моделирования микрооптомеханических системах. Показано, что метод макромоделей позволяет уменьшить вычислительные затраты. Разработана методология, которая позволяет исследовать микрооптомеханические системы на основе этого метода. Для экспериментального исследования была построена модель акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо.

Abstract

During the study we have made an analysis of modeling techniques in microoptomechanical systems, of which was chosen the method of reduced order modeling. Shown that the method of reduced order modeling can reduce the computational cost.. Developed the methodology that allows us to investigate microoptomechanical systems. For the experimnet was chosen the acceleromenter based on Fabry-Perot interferometer.

Введение

Микроэлектромеханические системы - малые интегрированных устройства или системы, которые сочетают электрические и механические компонентов. Они варьируются в размерах от микрометров до миллиметров, и их может быть любое количество, вплоть до миллиона. Примерами микромеханических устройств являются струйные картриджи для принтеров, акселерометры, миниатюрные роботы, микродвигатели, микрозеркала, микроприводы, оптические сканеры, жидкостные насосы и т.д. Новые устройства становятся реальными благодаря технологиям миниатюризации и интеграции обычных устройств. Из-за больших вычислительных затрат для расчета систем уравнений, получающихся, например, методом конечных элементов, (около 100000 уравнений и больше) для исследования микроэлектромеханических систем необходима моделирование на системном уровне.

В настоящее время не существует универсальных методов моделирования микросистем, позволяющих уменьшить вычислительные затраты. В данной работе рассматривается один из возможных подходов к снижению вычислительных затрат для моделирования микрооптомеханических систем. На рис. 1 представлена схема перехода на системный уровень, позволяющая уменьшить вычислительные затраты за счет использования макромоделей.

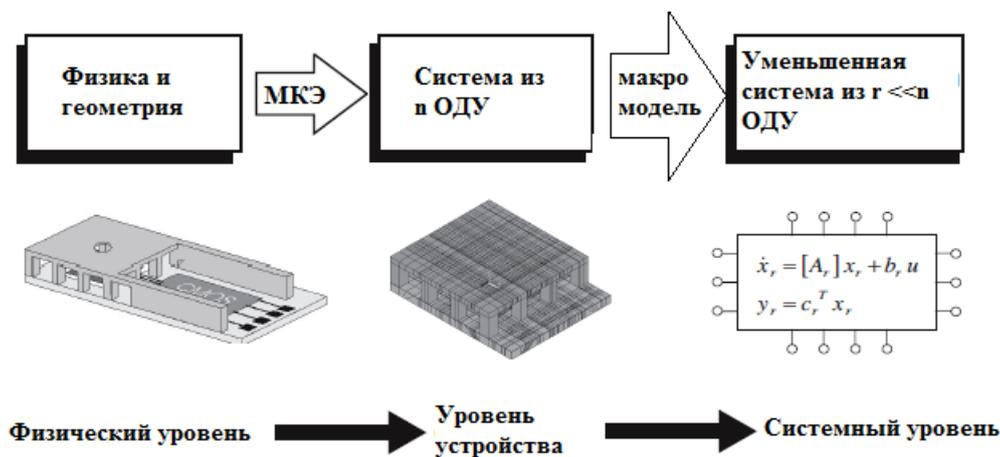


Рисунок 1 - Представление микрооптомеханических систем на различных уровнях моделирования

На физическом уровне для заданных геометрии и физических параметров строится конечно-элементная модель. Затем выполняется переход к моделям на более высоком уровне, базирующимся на обыкновенных дифференциальных уравнениях. Далее на основе метода макромоделей строится упрощенная модель устройства с сохранением ее основных свойств. Эта модель может быть использована на системном уровне проектирования микрооптомеханических систем для проведения оценочных расчетов.

1. Сравнительный анализ методов макромоделирования

Необходимо отметить, что макромоделирование широко использовалось в микроэлектронике задолго до того, как появились микросистемы. Его задачей было создание упрощенных эквивалентных схем замещения для электронных схем таким образом, чтобы они затем могли быть использованы в SPICE или аналогичном программном обеспечении.

Подобную методологию можно также применить и при разработке микросистем. Однако такой подход требует от разработчика интуитивный выбор правильной структуры макромоделей.

Другим подходом является подход, базирующийся на формальном преобразовании уравнений частных производных управляющих систем в обычные дифференциальные уравнения систем меньшего порядка. При этом этап построения эквивалентной схемы замещения не требуется.

Проведенный анализ литературных источников позволяет сделать вывод, что в настоящее время существует несколько основных подходов к решению задачи уменьшения размерности модели МЭМС при минимальной потере точности:

- методы сокращения размерности математической модели;
- методы на основе преобразования «звезда-треугольник»;
- гибридные методы.

В докладе проводится сравнительный анализ методов сокращения размерности математической модели.

Метод сокращения размерности математической модели. Исходную систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + b \quad (1)$$

где $A \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$;

$b, x \in \mathbb{R}^n$,

n - размерность системы;

можно представить в виде относительно узлов макромоделли [3]:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (2)$$

где $u \in R^m$ - вектор функций входов,
 $B \in R^n \times R^m$ - матрица рассеяния,
 $Y \in R^p$ - вектор выходных значений.

Зависимость между выходными значениями и состоянием системы описывается матрицей $C \in R^p \times R^n$ (следует отметить, что в общем случае $y = Cx + Du$, однако мы рассматриваем ситуацию, когда выход не зависит непосредственно от входа, то есть в нашем случае $D = 0$).

Идея сокращения размерности такой системы в том, что поведение вектора x во времени $x(t)$ можно эффективно описать некоторым подпространством малой размерности:

$$x = Xz + \varepsilon, z \in R^k, k \ll n \quad (3)$$

где $\varepsilon \in R^n$ - погрешность, $X \in R^n \times R^k$ - новый уменьшенный базис, z - новый вектор координат уменьшенного базиса.

С учетом (3) система (2) примет вид (рис. 2):

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \tilde{A}z + \tilde{B}u \\ y = \tilde{C}z \end{cases} \quad (4)$$

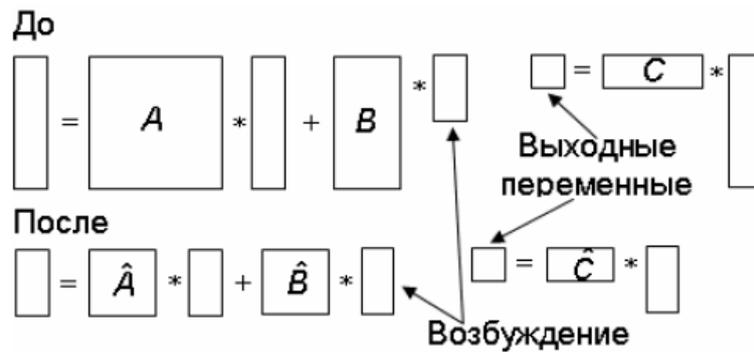


Рисунок 2 – Переход к макромоделли

Для линейных систем можно выполнить переход в область комплексного переменного на основе преобразования Лапласа, где оператор Лапласа $L\{\}$ применен к входным $L\{u(t)\} = U(s)$ и выходным $L\{y(t)\} = Y(s)$ векторам, а зависимость между входом и выходом описана передаточной функцией $G(s)$:

$$Y(s) = G(s)U(s) \quad (5)$$

В этом случае передаточную функцию можно выразить через матрицы системы (4) как:

$$G(s) = \tilde{C}(sI - \tilde{A})^{-1}\tilde{B} \quad (6)$$

Методы, основанные на подпространствах Крылова. В качестве подпространства уменьшенного размера часто выбираются подпространства Крылова [3]. Подпространство Крылова размерности m , порожденное вектором v и матрицей A , определено как:

$$K_m(v, A) \stackrel{\text{def}}{=} \text{span}\{v, Av, A^2v, \dots, A^{m-1}v\}$$

Прийти к уменьшенному базису можно, используя алгоритмы Арнольди или Ланцоша.

Алгоритм Арнольди генерирует ортонормированный базис $X \in R^n \times R^k$ и матрицу Хессенберга $H_A \in R^k \times R^k$, связанную с первоначальной матрицей соотношением:

$$X^*AX = H_A \quad (7)$$

Применяя к (6) разложение в ряд Тейлора в окрестности s_0 , для алгоритма Арнольди получим:

$$\tilde{A} = H_A^{-1}, \tilde{B} = H_A^{-1}X^*(A - s_0I)^{-1}B, \tilde{C} = CX \quad (8)$$

Алгоритм Ланцоша генерирует два биортогональных базиса $K_m(v, A)$ и $K_m(w, A^T)$, содержащиеся в матрицах X и Y ($X, Y \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^k$), и матрицу Хессенберга H_L , которая находится в трехдиагональной форме. Полученные матрицы связаны соотношениями:

$$\begin{aligned} Y^* X &= I, \\ Y^* A X &= H_L \end{aligned} \quad (9)$$

В этом случае система (6) после разложения в ряд Тейлора в окрестностях s_0 примет вид:

$$\tilde{A} = H_L^{-1}(I + s_0 H_A), \tilde{B} = H_L^{-1} Y^* (A - s_0 I)^{-1} B, \tilde{C} = C X \quad (10)$$

В случае симметричной матрицы A и $v = \omega$ алгоритмы Арнольди и Ланцоша математически эквиваленты.

Недостатком алгоритма Ланцоша является меньшая по сравнению с алгоритмом Арнольди устойчивость.

Методы, основанные на сингулярном разложении. Методы данной группы основываются на следующей теореме [3]:

Пусть $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $r = \text{rank} A$. Тогда существуют положительные числа $\sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_r > 0$ и унитарные матрицы $U \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $V \in \mathbb{R}^{m \times m}$ такие, что:

$$A = V \Sigma U^* \quad (11)$$

где σ_i - сингулярные числа, вычисляемые как $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i(A^* A)}$; $U = [u_1, \dots, u_n]$ и $V = [v_1, \dots, v_m]$ - унитарные матрицы, $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_r) \in \mathbb{R}^{m \times n}$. Отсюда можно представить матрицу A в виде:

$$A = \sum_{i=1}^r \sigma_i v_i u_i^* \quad (12)$$

В этом случае лучшая аппроксимация $X \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ранга $k \leq r$ матрицы A вычисляется как:

$$X = \sum_{i=1}^k \sigma_i v_i u_i^* \quad (13)$$

При этом ошибка составит:

$$\min_{k \times r} \|A - X\|_2 = \sigma_{k+1}(A) \quad (14)$$

В случае линейной динамической системы (2) необходимо рассмотреть уравнения Ляпунова:

$$A^P + P A^T + B B^T = 0, A^T Q + Q A + C^T C = 0 \quad (15)$$

где P - граммиан управляемости и Q - граммиан наблюдаемости. В таком случае можно вычислить сингулярные числа Хенкеля σ_i , которые играют для динамических систем ту же роль, что и сингулярные числа для конечномерных матриц:

$$\sigma_i = \sqrt{\lambda_i(PQ)} \quad (16)$$

Как только эти значения известны, становятся доступны методы уменьшения размера модели с погрешностями, лежащими в гарантируемых пределах, для разности между передаточной функцией первоначальной системы $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_r) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ порядка n и ее уменьшенной версией порядка k :

$$\sigma_k \leq \|\Sigma - \tilde{\Sigma}\| \leq 2(\sigma_{k+1} + \sigma_{k+2} + \dots + \sigma_n) \quad (17)$$

при условии, что сингулярные значения Хенкеля были отсортированы в порядке убывания. Данное уравнение справедливо для произвольных входных функций. Это означает, что уменьшение размера модели, основанное на этих методах, может быть полностью автоматическим. Успех уменьшения размера модели зависит только от скорости спада значений Хенкеля [3].

2. Макромодели микрооптомеханических систем

В докладе рассмотрены методы макромоделирования для автоматического создания точных динамических моделей меньшего порядка для микрооптомеханических систем. Разработана методология, которая позволяет получить макромоделели микрооптомеханических систем.

Для апробации предложенных подходов была выбрана модель акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо [4] (рис. 3).

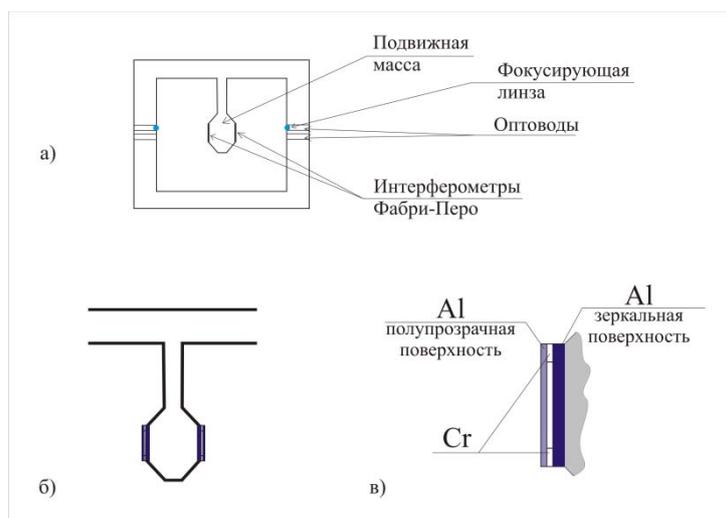


Рисунок 3 – Микрооптомеханический акселерометр: а) общий вид конструкции МОЭМ, б) подвижная масса, в) интерферометр Фабри-Перо

В качестве программного обеспечения была выбрана программный комплекс Ansys Multiphysics, базирующийся на использовании метода конечных элементов. В данной среде была создана модель акселерометра (рис. 4).

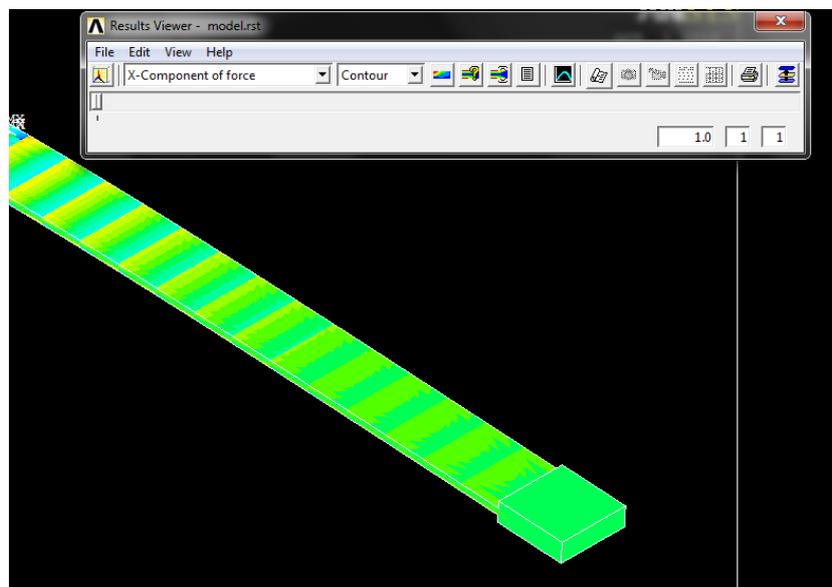


Рисунок 4 – Иллюстрация возможностей программного комплекса Ansys Multiphysics

Для получения макромодели был выбран метод ROMTool. В нашей работе использовались модальный и статический анализы. После проведения анализов, результат можно посмотреть непосредственно в среде Ansys.

Заключение

В докладе рассмотрены различные подходы к уменьшению вычислительных затрат при моделировании микрооптомеханических систем. Показано, что метод макромоделей сокращает время вычисления, что уменьшит время разработки и исследования микросистем. Разработанная методология может быть применима ко всем микрооптомеханическим системам.

Литература

1. A. V. Salvatore MicroElectroMechanical Systems (MEMS) – 2001 г. [<http://www.csa.com/discoveryguides/mems/overview.php>]
2. T. Bechtold Model Order Reduction of Electro-Thermal MEMS – Изд. Университет Фрайбурга. 2005 г. – 208 с.
3. В.В. Ладогубец, А.Ю. Безносик, А.В. Крамар, А.Д. Финогенов Методы макро моделирования МЭМС - Электроника и связь. Тематический выпуск «Проблемы электроники», ч.1 - 2008 г.
4. Косолапов И.А. Моделирование микроакселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо в САПР ANSYS, Сборник трудов Научно-технические технологии и интеллектуальные системы – Москва, 2009, с.98-100
5. Справочник ANSYS [<http://www.kxcad.net/ansys/index.htm>]

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 10-07-00171-а).

СИСТЕМЫ КАЧЕСТВА НА ПРЕДПРИЯТИИ «LG ELECTRONICS»

Иванов А. М.

Научный руководитель: доцент, к.т.н., Власов А.И.
МГТУ им. Баумана, Москва, РФ

QUALITY SYSTEM IN «LG ELECTRONICS» FACTORY

Ivanov A.M.

Research advisor: docent, c.e.s., Vlasov A.I.
Bauman University, Moscow, RF

Аннотация

Рассмотрена роль международных стандартов по обеспечению качества в организации производственного процесса предприятий и производственных отношений между предприятиями. Описана практическая реализация кампанией LG основных направлений деятельности в области качества. Упомянута важность участия каждого сотрудника в достижении высокого качества продукции.

Abstract

The role international standards on quality maintenance in the organization of production of the enterprises and relations of production between the enterprises is considered. Practical realization by campaign LG of the basic lines of activity in the field of quality is described. Importance of participation of each employee in quality achievement of production is mentioned.

Введение

Качество продукции является важнейшим критерием рентабельности современного предприятия. Этот критерий в последнее время ценится больше, чем количество выпускаемой продукции. Международные стандарты [1] и различные системы качества помогают производителям обеспечить высокий уровень качества выпускаемой продукции и предоставить предприятиями-поставщиками гарантии качества заказчикам. Эффективные методы обеспечения качества продукции являются приоритетными и у кампании «LGElectronics» при организации производственного процесса, которая использует их на всех этапах жизненного цикла продукции [2].

Образованная в 1958 году, компания LG Electronics, Inc. (LG) является мировым лидером и разработчиком инновационных технологий на рынке потребительской электроники, бытовых приборов и мобильной связи, имеющим свыше 112 предприятий по всему миру, (в том числе 81 дочернее предприятие), на которых занято более 84 000 человек. Компания состоит из пяти подразделений: Home Entertainment, Mobile Communications, Home Appliance, Air Conditioning и Business Solutions. LG является крупнейшим в мире производителем мобильных телефонов, телевизоров с плоским экраном, аудио и видео техники, кондиционеров и стиральных машин. В начале этого века LG открыла свой завод в Московской Области (п.Дорохово). В особенности LG Electronics - акцент на достижении благоприятного и устойчивого роста в области мобильных коммуникаций и домашних развлечений для укрепления лидирующих позиций в IT индустрии, в то же время, увеличивается доля рынка в секторах Home Appliance, Air Conditioning и Business Solutions. В рамках данной работы проанализируем аспекты процедур обеспечения качества компании LG, ее корпоративной культуры, обеспечивающей доминантное положение на рынке, на основе анализа материалов, полученных в рамках прохождения стажировки на заводе LG (МО, Дорохово) [2].

Международная организация по стандартизации (ИСО) и Международная техническая комиссия (МЭК) разработали международные стандарты серии ИСО 9000 [1]. Основное назначение международных стандартов – это создание на международном уровне единой методической основы для разработки новых и совершенствования действующих систем

качества и их сертификации. Типичные этапы жизненного цикла в своей совокупности образуют «петлю качества» [1-5].

В соответствии с международными стандартами ИСО 9000 выделяются основные направления деятельности в области качества, в основе которых лежит цикл Деминга (рис.1):

- планирование качества;
- управление качеством;
- обеспечение качества;
- улучшение качества.

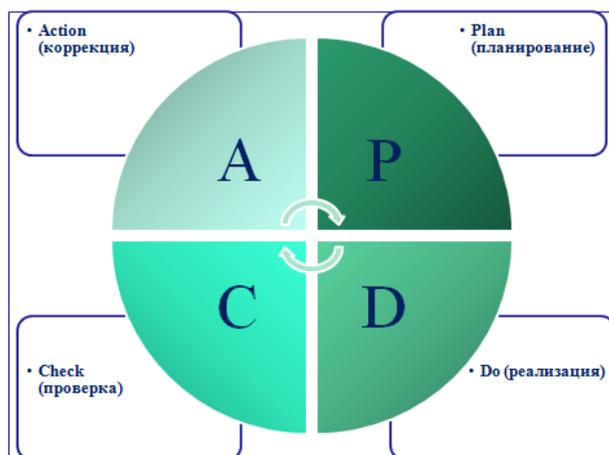


Рисунок 1 – цикл Деминга

Планирование качества осуществляется в центральном офисе LG при планировании производства конкретной продукции. Оно включает в себя: определение требований к качеству, выработки положений по улучшению качества, подготовку программы качества, планирование затрат на достижение необходимого уровня качества, проверок системы качества и другое. Данными вопросами занимается специально созданная руководством LG экспертная коллегия.



Рисунок 2 – основные виды деятельности, влияющие на качество

В состав процедур **управления качеством** входят: контроль качества, разработка и реализация мер корректирующего воздействия. Основная функция управления качеством –

выявлять каждое отклонение от установленных требований к качеству, обусловленное проектированием продукции, соответствием продукции проекту и материально-техническим обеспечением. Данные процедуры проводятся непосредственно на предприятии-изготовителе совместно отделами «Quality Department» (QD) и «R&D». Первый занимается, в основном, сбором и обработкой данных о качестве продукции на всех этапах ее производства. Отдел «R&D» занимается исследованием брака, выявлением причин, вызвавших те или иные неисправности. Такая структура управления качеством позволяет в короткие сроки определять и решать проблемы, связанные с поставщиками, отклонениями от технического процесса на производстве, некомпетентностью рабочего персонала и другими.

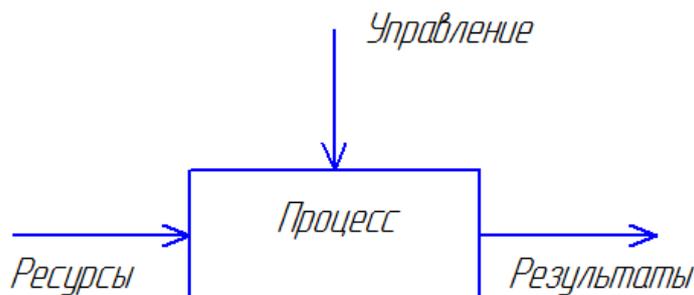


Рисунок 3 – Управление процессом

Так же при отделе «QD» создана инженерно-аналитическая группа для проверки соответствия техническим требованиям всех этапов производства, исследования возникновения неисправностей.

Обеспечение качества включает в себя деятельность по созданию уверенности в выполнении требований к качеству продукции у руководства предприятием и деятельность, направленную на обеспечение уверенности потребителей, что все элементы системы качества функционируют в управляемых условиях. Эта деятельность заключается в организации всей системы качества в соответствии с международными стандартами ИСО.



Рисунок 4 – «Звезда качества» [5]

Система качества документируется в соответствии с МС ИСО 90011. В документах подробно описываются процедуры по обеспечению качества, а для выполнения этих процедур разрабатываются инструкции. Эта функция так же возложена на «QD».

Улучшение качества является глобальной задачей для компании LG и осуществляется в центральном офисе в Корее.

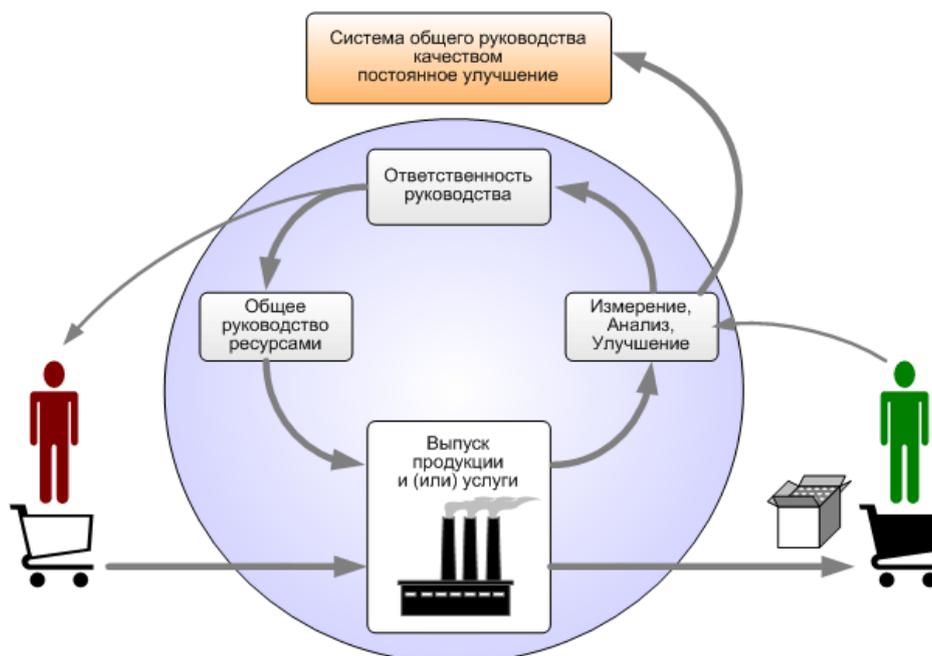


Рисунок 5 – процесс общего руководства

Многолетний опыт компании LG в управления качеством показывает, что эффективное управление возможно лишь при наделении каждого работника правами и обязанностями, однако и мера участия и ответственности руководителя предприятия несоизмеримо выше. Обычно в компетенцию руководителей входит: определение направлений деятельности и установление их приоритетности, построение организационной структуры управления качеством, определение уровня подготовки кадров и их квалификации.

Мотивация всех сотрудников компании, строгое соблюдение международных стандартов, контроль всех этапов производственного процесса – залог успешного развития LG и производства продукции высокого качества.

Литература

1. Международные стандарты серии ИСО 9000 [<http://www.iso.staratel.com>]
2. Линейка продуктов фирмы LG [<http://www.lg.com/ru/about-lg/corporate-information/overview/vision.jsp>]. Проверено 30.01.11.
3. В. А. Васильев, Ш. Н. Каландаришвили Управление качеством и сертификация. - Изд. Интермет Инжиниринг. 2002 г. - 416 с. [http://www.tqm.spb.ru/4_books.shtml]
4. Никитин В. А. Управление качеством на базе стандартов ИСО 9000:2000. - Изд. Питер. 2002. - 272 с. [http://www.tqm.spb.ru/4_books.shtml]
5. Маркелов В.В., Кабаева А.С. Управление качеством микро- и наносистем. - Изд. МГТУ им. Баумана 2011. [http://nanotech.iu4.bmstu.ru/nano_engineering/literature]

ЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ДЕТЕКТОРОВ

Кочетов А.С.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Власов А. И.
Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана, Москва,
Россия

ELECTRONIC DEVICE FOR THE DETECTOR CALIBRATION

Kochetov A.S.

Supervisor: Ph.D., Associate Professor Vlasov A. I.
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Аннотация

В докладе представлена концепция создания электронного устройства для калибровки детектора. Рассказывается принцип работы сцинтилляторных детекторов в эксперименте Double Chooz. Рассмотрена идея калибровки такого детектора при помощи электронного устройства. Представлена структура электронного устройства.

Abstract

The report introduces the concept of creating an electronic device for calibration of the detector. Describes the principle of scintillator detectors in experiment Double Chooz. Considered the idea of calibration of such a detector with an electronic device. The structure of the electronic device.

Введение

В области ядерной физики при изучении явлений микромира широко используются различные детекторы. В настоящее время во Франции совместно с российскими учеными ведется эксперимент Double Chooz по изучению потока антинейтрино от ядерного реактора с помощью двух сцинтилляторных детекторов частиц рис.1.

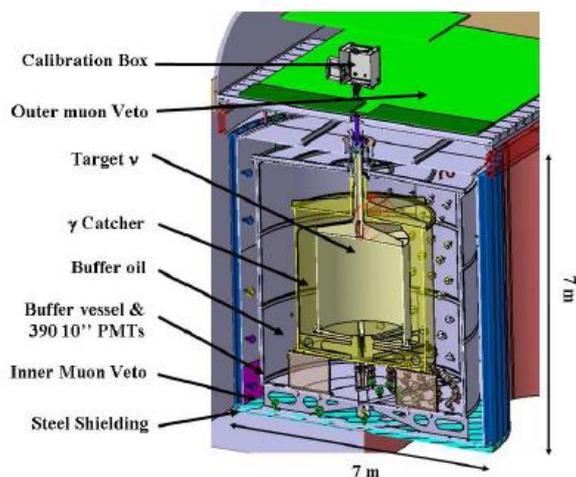


Рисунок 1 – Схема детектора эксперимента Double Chooz

Основными компонентами детектора Double Chooz являются жидкий сцинтиллятор и ФЭУ, регистрирующие вспышки в нём. Сцинтиллятор - это жидкость, в которой много протонов и под действием пучка нейтрино там протекают реакции "протон + антинейтрино = нейтрон + позитрон", а сцинтиллятор вообще это вещество, которое обладает таким свойством, что при захвате частицы он преобразует её энергию в световую (фотоны светового спектра), то есть происходят две вспышки - первая от позитрона и вторая от нейтрона.

В этом докладе речь пойдет о электронном устройстве, предназначенном для погружения в сцинтилляторный детектор с целью его калибровки.

В детекторе Double Chooz регистрация антинейтрино ведётся посредством регистрации создаваемых ими нейтронов. Поэтому для оценки эффективности детектора необходимо знать вероятность регистрации им нейтрона. Детектор частиц как любое устройство не может быть абсолютно совершенным, т.е. регистрировать 100% нейтронов, которые попадают в его мишень. Он регистрирует лишь какой-то процент «прилетевших» нейтронов. Калибровка детектора заключается в нахождении этого процента и затем использовании его.

Электронное устройство, описанное в данном докладе, предназначено для калибровки сцинтилляторных детекторов по их чувствительности к нейтронам. Электронное устройство состоит из трех основных частей: ионизационной камеры (ИК), мобильного модуля и сервисного блока. На рис.2 изображена структурная схема работы устройства. В ИК 1 находится радиоактивное вещество 2, которое с некоторой частотой распадается внутри камеры. В результате распада образуются нейтроны 3 и осколки деления 4. Нейтроны не регистрируются ИК, но фотоны образованные при взаимодействии нейтрона и сцинтилятора 5 регистрируются ФЭУ 6, осколки деления ионизируют газ внутри камеры, в результате чего с камеры можно снять полезный электрический сигнал – обозначающий факт вылета нейтронов. Данный электрический сигнал обрабатывается с помощью электроники мобильного блока 7 и запускает светодиод 8. Фотоны 9 от вспышки светодиода можем регистрировать с помощью ФЭУ детектора практически в то же самое время, что и фотоны от реакции нейтрона, образовавшегося при распаде.

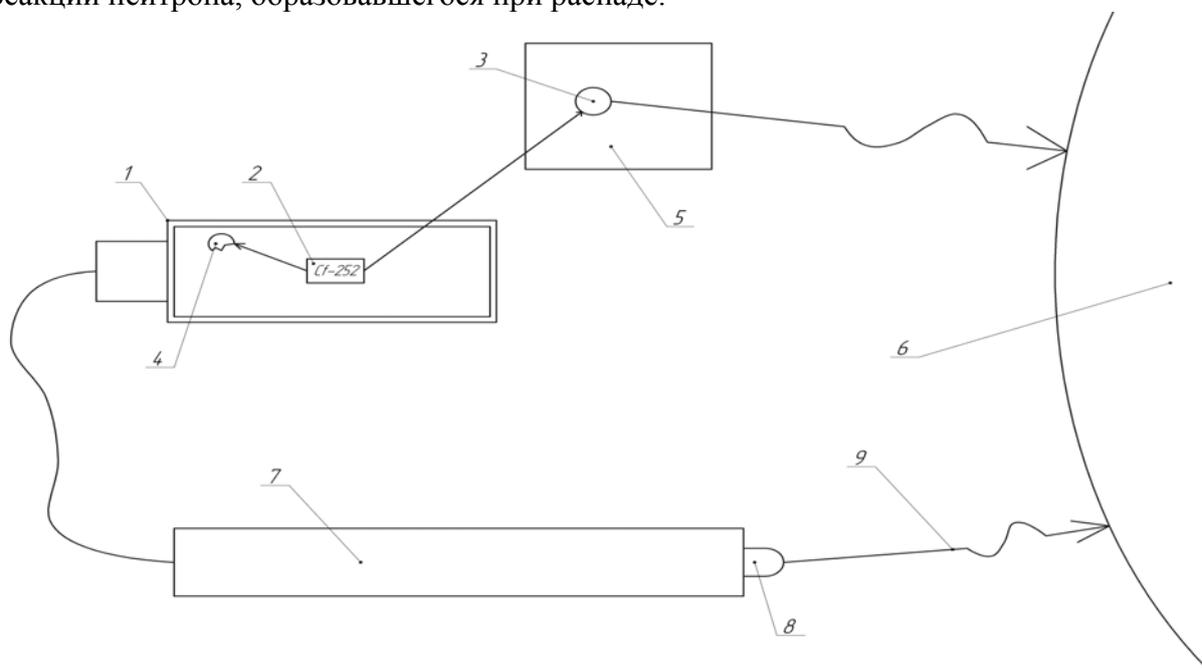


Рисунок 2 – Структурная схема работы устройства

В итоге мы можем сосчитать количество нейтронов образовавшихся в результате распада, вычесть значение фона (нейтроны могут прилететь и извне) и разделить на количество зарегистрированных вспышек светодиода. Количество вспышек светодиода играют роль эталона. В результате получим коэффициент регистрации детектором нейтронов. Этот коэффициент будет учитываться в дальнейших расчетах количества зарегистрированных детектором нейтрино.

1 Концепция устройства

В эксперименте Double-Chooz для нейтронных калибровок детектора предлагается использовать ионизационную камеру (ИК) с радиоактивным источником Cf-252 внутри.

В силу особых предосторожностей при работе с гадолиниевым сцинтиллятором желательно минимизировать количество материалов, вводимых в мишень детектора при

калибровках. В связи с этим камера вместе с электроникой должна быть беспроводной и портативной.

Сигнал камеры после усиления и дискриминации подается на светодиод, вспышка которого регистрируется основным детектором и обеспечивает “триггер”.

Вся необходимая электроника должна быть расположена в этом случае непосредственно вблизи камеры. Между камерой и электроникой должно быть разъемное соединение, позволяющее заменять камеру и электронику.

Камера и электроника вместе с аккумуляторами питания должны находиться внутри герметичного цилиндра из тефлона или акрилика, размер которого будет зависеть от того насколько миниатюрной окажется печатная плата с электроникой. В корпус герметичного цилиндра должен быть вмонтирован светодиод, посылающий импульсы света в основной детектор.

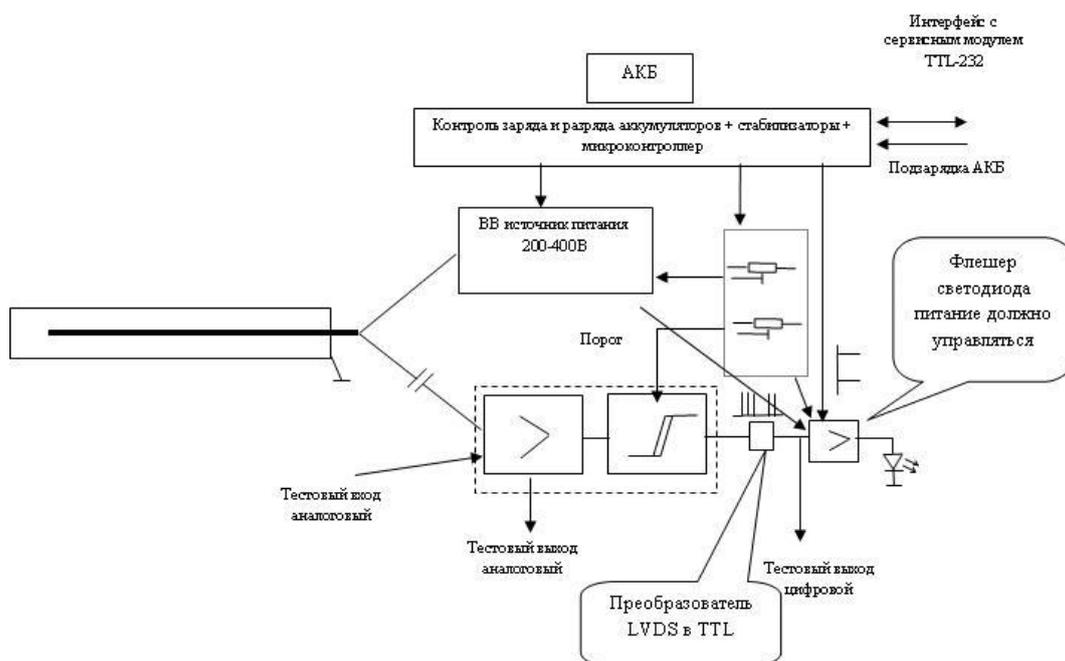


Рисунок 3 – Структурная схема электронного устройства для калибровки детектора

Должна быть предусмотрена система подзарядки аккумуляторов, питающих электронику. Проектирование ведется в два этапа.

На первом этапе сделан полнофункциональный прототип с большими размерами и большим количеством внешних интерфейсов для тестирования.

На втором этапе необходимо сделать опытный образец миниатюрного устройства.

2 Состав изделия

Ионизационная камера

ИК рис. 4 является детектором осколков деления и альфа частиц. Осколки деления сопровождаются испусканием нейтронов, которые не детектируются ИК, но регистрируются большим детектором и используются для его калибровки.



Рисунок 4 – Внешний вид ионизационной камеры

Ионизационная камера — газонаполненный датчик, предназначенный для измерения уровня ионизирующего излучения. Измерение уровня излучения происходит путём измерения уровня ионизации газа в рабочем объёме камеры, который находится между двумя электродами. Между электродами создаётся разность потенциалов порядка 400В. При наличии ионов в газе между электродами возникает ионный ток, который может быть измерен. Ток при прочих равных условиях пропорционален скорости возникновения ионов и, соответственно, мощности дозы облучения.

Мобильный модуль

Мобильный модуль нормализует (усиливает) сигнал поступающий с ионизационной камеры, дискриминирует его в соответствии с заданным порогом и через открытый оптический канал (светодиод) передает его для регистрации через ФЭУ основного детектора.

В состав электроники мобильного модуля входят следующие компоненты:

- усилитель сигнала с камеры
- дискриминатор (с управляемым порогом)
- высоковольтный источник питания (управляемый)
- устройство заряда и контроля аккумуляторов
- драйвер светодиода

В виду того, что устройство должно быть портативным, источник высоковольтного напряжения для питания ионизационной камеры выполнен на DC-DC конвертере компании EMCO, управляемым цифровыми потенциометрами AD5220. Полезный сигнал с камеры через разделяющий конденсатор подается на усилитель-дискриминатор, который в свою очередь передает TTL сигнал на запуск драйвера светодиода.

Усилитель-дискриминатор выполнены на заказной микросхеме ADB-1(ОИЯИ г.Дубна). Порог дискриминатор управляется при помощи тех же цифровых потенциометров. В качестве драйвера светодиода взята «Схема Капустинского» на быстродействующих транзисторах. Мобильный блок имеет автономное аккумуляторное питание. Блок контроля разряда аккумуляторов имеет встроенный микроконтроллер, который при падении напряжения ниже критического выключает блок высоковольтного питания, что приводит к прекращению сигналов от ИК и дискриминатора. Сигнализация о разряде аккумулятора ниже допустимого уровня передается через открытый оптический канал путем выдачи на драйвер светодиода импульсов с частотой 1 Гц.

Сервисный блок представляет из себя электронное устройство питаемое от бытовой сети 220 В и предназначенное для подзарядки мобильного блока, также предусмотрена связь с компьютером для «перепрошивки» микроконтроллера, встроенного в мобильный блок.

Литература

1. The DoubleChooz Experiment [электронный ресурс <http://www.dchooz.org>], проверено 18.02.11 в 0.21
2. Устройство ионизационной камеры [электронный ресурс <http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/detectors/ion.html>], проверено 18.02 в 0.21
3. Analog Devices, AD5220 [электронный ресурс http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD5220.pdf], проверено 18.02 в 0.21

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КЛАССИФИКАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Ивченко М.О., Чернов М.М.

Канд. техн. наук, доцент, Власов А.И.

Московский государственный технический университет им Н.Э. Баумана

METHODS AND TOOLS FOR RAMAN SPECTRA CLASSIFICATION

Ivchenko M.O., Chernov M.M.

Ph.D., associate professor, Vlasov A.I.

MSTU n.a. N.E. Bauman, Moscow, Russia

Аннотация

В данной работе описывается метод генетического программирования, предназначенный для классификации спектров рамановского рассеяния по их компонентному составу. Представлена двухуровневая функция оценки приспособленности, призванная уменьшить риск ошибочной классификации спектров при дальнейшем использовании полученных правил.

Abstract

This paper describes a genetic programming method for identification of components within mixtures of materials using Raman scattering data. The presented two-level fitness function allows for the minimization of risks associated with possible false classification of future spectra.

Введение

Одно из важнейших применений рамановской спектроскопии заключается в определении молекулярного состава образца по его спектру рамановского рассеяния. В данной работе описывается метод генетического программирования, предназначенный для классификации спектров рамановского рассеяния по их компонентному составу.

Генетическое программирование имеет преимущество над искусственными нейронными сетями и хемометрическими методами идентификации состава вещества по его рамановскому спектру, заключающееся в том, что сгенерированные правила распознавания поддаются интерпретации и могут быть использованы как отдельно, так и совместно с экспертной оценкой для классификации спектров.

Распознаванию спектров рамановского рассеяния мешает ряд проблем. Присутствие флуоресцентных соединений, примесей и сложных смесей добавляют трудности при идентификации соединений по их спектрам. Более того, концентрация исследуемого компонента бывает так мала, что она находится вблизи границы предела обнаружения используемого измерительного инструмента. Кроме того, самые интенсивные пики в спектрах компонентов вещества могут приходиться на одну область в спектре исследуемого вещества.

Также существуют трудности, вызванные тем, что спектры рамановского рассеяния обладают высокой разрядностью и низкой численностью. Зачастую приходится идентифицировать вещества, основываясь на малом количестве справочных спектров.

В ответ на это, вместо того, чтобы иметь целью лишь эволюцию правил, корректно классифицирующих обучающие выборки данных, необходимо также оптимизировать выбор правил с тем, чтобы минимизировать вероятность ошибочной классификации будущих выборок, тем самым минимизировав проблемы, связанные с малым количеством образцов и их спектров [1].

Главная задача представленного метода заключается в точном определении вхождения определенного компонента в исследуемое вещество по его спектру рамановского рассеяния.

1. Классификация компонентов вещества

В данной работе каждая особь разработанного генетического алгоритма представляет собой математическую формулу, составленную из функций и переменных. К функциям относятся простые математические операторы «+» и «-», а переменные соответствуют длинам волн спектра. Популяция инициализируется случайными сочетаниями функций и переменных для создания *бинарных деревьев* ограниченной глубины H (в данной работе $H = 5$).

В совокупности функции и длины волн, выбранные особью i , формируют формулу E_i , вычисление значения которой по соответствующим интенсивностям для заданного спектра S_j дает значение $E_i(S_j)$.

Значение $E_i(S_j)$ интерпретируется как индикатор присутствия ($E_i(S_j) \geq 0$) либо отсутствия ($E_i(S_j) < 0$) соответствующего компонента в веществе.

После инициализации популяции вычисляется приспособленность каждой ее особи (формулы) и самые «удачные» (приспособленные) особи отбираются для скрещивания, получая в результате следующее поколение популяции [1].

Выбранная в работе стратегия «разведения» особей заключается в применении принципов элитизма, перекрестного скрещивания и мутации.

Элитизм подразумевает копирование двух самых приспособленных особей из каждой популяции в следующее поколение без изменений (мутаций). Остальные особи нового поколения создаются с помощью *перекрестного скрещивания* популяции, которое заключается в случайном выборе двух особей с учетом равномерного распределения из лучших 1.5% особей предыдущей популяции и создания нового индивида, сочетающего свойства обоих родителей. *Мутация* включает в себя случайные изменения в особи новой популяции и имеет фиксированную вероятность.

Первичная цель эволюции особей является способность корректно классифицировать все обучающие выборки. Однако целесообразным представляется ввод вторичной цели, заключающейся в минимизации риска будущих ошибочных классификаций, а также дополнительной цели, связанной с уменьшением трудоемкости вычислений при классификации.

Для достижения первичной цели приспособленность особи i вычисляется как

$$F_1(i) = \sum_{j=1}^{N_i} A_i(S_j), \quad (1)$$

где $A_i(S_j)$ является характеристикой точности классификации особью i спектра S_j , а N_i – количество спектров в обучающей выборке. С помощью характеристики точности $A_i(S_j)$, оценка в +1 балл присваивается особи за каждый правильно классифицированный спектр и – 2 балла – за каждую ошибочную классификацию (ложно-положительные и ложно-отрицательные результаты).

Для достижения вторичной цели необходим механизм, с помощью которого, в случае, если две особи одинаково корректно классифицируют выборку, предпочтение отдавалось бы особи, обладающей наибольшей степенью уверенности. Степень уверенности классификации $C_i(S_j)$ особи i по отношению к спектру S_j можно задать как

$$C_i(S_j) = \begin{cases} |E_i(S_j)|, & \text{если } A_i(S_j) > 0 \\ 0, & \text{если } A_i(S_j) \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Для достижения вторичной цели, приспособленность особи i целесообразно принимать за

$$F_2(i) = \min_j \left\{ C_i(S_j) \right\}. \quad (3)$$

Иными словами, $F_2(i)$ отражает наименьшую степень уверенности для всех спектров в обучающей выборке: если особь ошибочно классифицирует хотя бы один элемент обучающей выборки, ее значение $F_2(i)$ обнуляется.

В результате $F_2(i)$ не влияет на приспособленность, пока особь не сможет корректно идентифицировать все обучающие выборки. F_2 выступает в качестве критерия ранжирования для тех особей, которые приспособились корректно распознавать все обучающие выборки. Это способствует эволюции особей с более высокими степенями уверенности, уменьшая, тем самым, риск ошибочной классификации спектров при дальнейшем использовании сформированных правил [1].

Таким образом, с учетом (1) и (3), суммарная приспособленность особи i вычисляется как

$$F(i) = F_1(i) + F_2(i). \quad (4)$$

Наиболее приспособленной считается особь с максимальным значением $F(i)$.

Новые популяции продолжают создаваться до наступления состояния *схождения*. Схождением называется состояние популяции, в котором все особи популяции находятся в области некоторого экстремума и почти одинаковы. Скрещивание практически никак не изменяет популяции, а мутирующие особи склонны вымирать, так как менее приспособлены. Таким образом, схождение популяции означает, что достигнуто решение, близкое к оптимальному [3].

2. Моделирование

2.1 Исходные данные

Исходные данные в данной работе представляют собой спектры рамановского рассеяния чистых образцов (содержащих 100% концентрации исходного вещества). Спектр представлен в виде 2-х мерного целочисленного массива $\mathbf{V}[\mathbf{w}][\mathbf{I}]$, где \mathbf{w} – частота, \mathbf{I} – интенсивность.

На основании базового набора спектров получают набор обучающих \mathbf{V} спектров по следующей формуле:

$$I_{Bj} = c_{j1} \cdot I_{B1}(\omega) + c_{j2} \cdot I_{B2}(\omega) + c_{j3} \cdot I_{B3}(\omega) + c_{j4} \cdot I_{B4}(\omega) + c_{j5} \cdot I_{B5}(\omega), \quad (5)$$

где $I_{B1}(\omega), \dots, I_{B5}(\omega)$ – базовые спектры, I_{Bj} – j -й обучающий спектр

Значения c_{ji} удовлетворяют системе уравнений:

$$\begin{cases} c_{ji} = n \cdot C_B, \\ c_{ji} \in [0,1], \\ \sum_{i=1}^5 c_{ji} = 1. \end{cases} \quad (6)$$

где C_B – шаг изменения концентрации для обучающих спектров, $n \in \mathbf{N}$.

Аналогичным образом получают и набор тестовых T , только с другим шагом изменения концентрации C_T

Таким образом обучающие и тестовые спектры представляют собой набор линейных комбинаций спектров базового набора B . Шаг изменения концентрации различен при получении обучающего и тестового наборов.

2.2 Проведение моделирования

В начале для первого базового спектра инициализируется популяция путем задания случайных сочетаний функций и переменных для создания *бинарных деревьев* ограниченной глубины H (в данной работе $H = 5$).

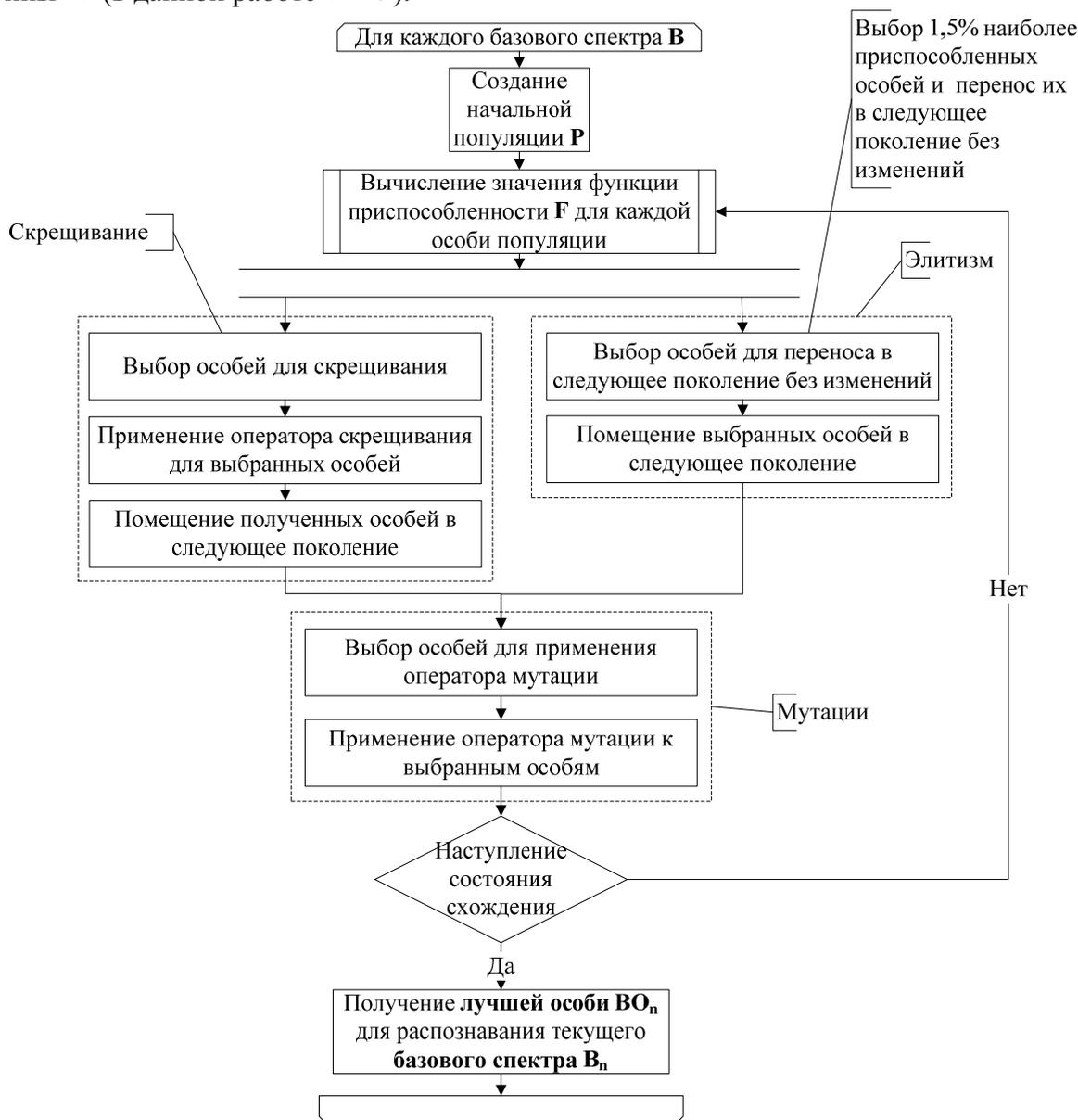


Рисунок 2.1 - Моделирование процесса эволюции

После инициализации популяции вычисляется приспособленность каждой ее особи по формуле (1) и самые «удачные» (приспособленные) особи отбираются для скрещивания, получая в результате следующее поколение популяции [1].

Параллельно со скрещиванием применена *стратегия элитизма*, которая подразумевает копирование двух самых приспособленных особей из каждой популяции в следующее поколение без изменений.

Затем идет *мутация*, включающая случайные изменения в особи новой популяции и имеющая фиксированную вероятность.

После мутации идет проверка на наступления *состояния схождения* и в зависимости от результата идет создание нового поколения, либо выход из цикла и вывод лучшей формулы.

Вычисление функции приспособленности проводится путем применения формулы особи к каждому спектру набора обучающих спектров E . Значение Z_m интерпретируется как индикатор присутствия ($Z_m \geq 0$) либо отсутствия ($Z_m < 0$) соответствующего компонента в веществе. При верном угадывании присутствия или отсутствия компонента в веществе, согласно (1), идет увеличение функции приспособленности на 1, при неправильном – уменьшается на 2.

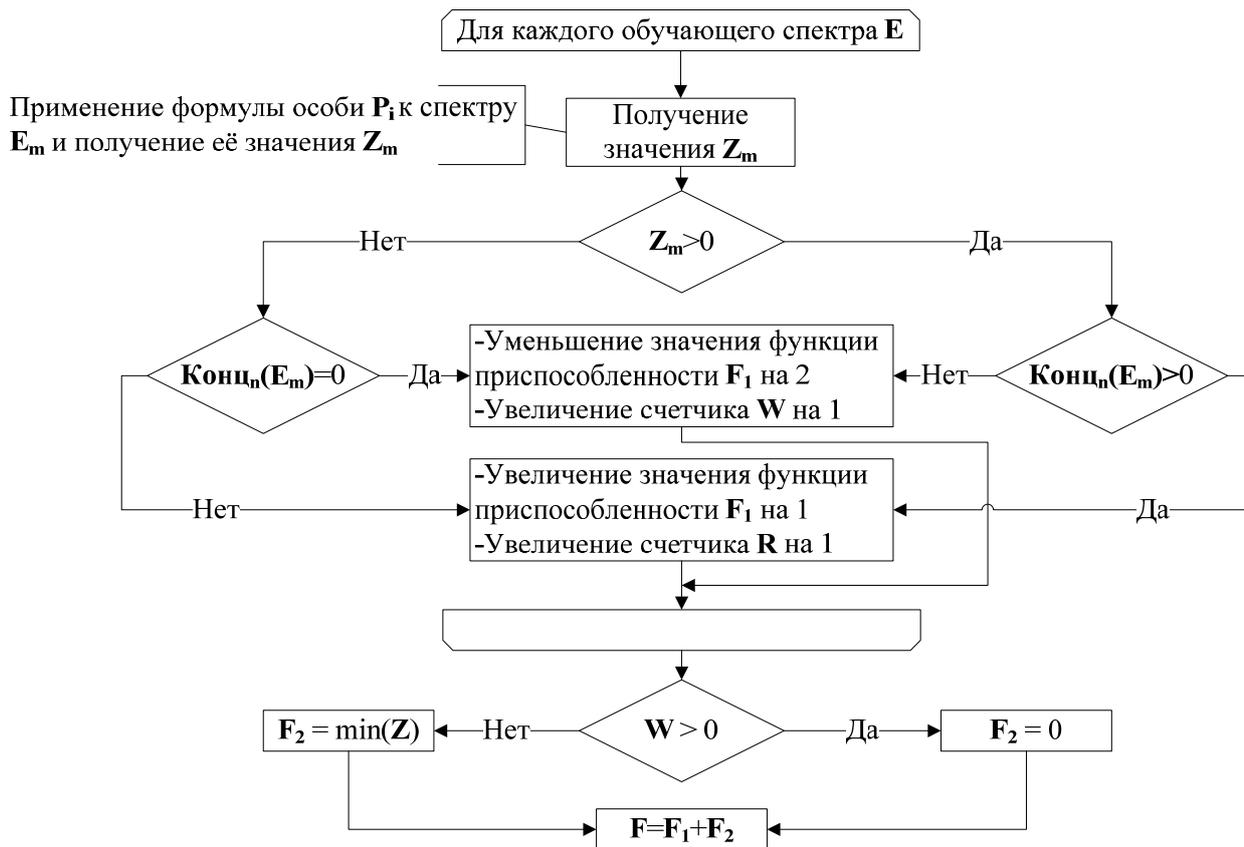


Рисунок 2.2 - Вычисление значения функции приспособленности

Если особь правильно классифицировала все спектры тестового набора T , согласно формуле (3), к значению её функции приспособленности прибавляется бонус равный модулю наименьшей степени уверенности особи при классификации тестовых спектров.

2.3 Результаты моделирования

Результаты процесса моделирования могут быть представлены в виде бинарных деревьев. Пример особей полученных в результате эволюции.

Для 1-го базового спектра:

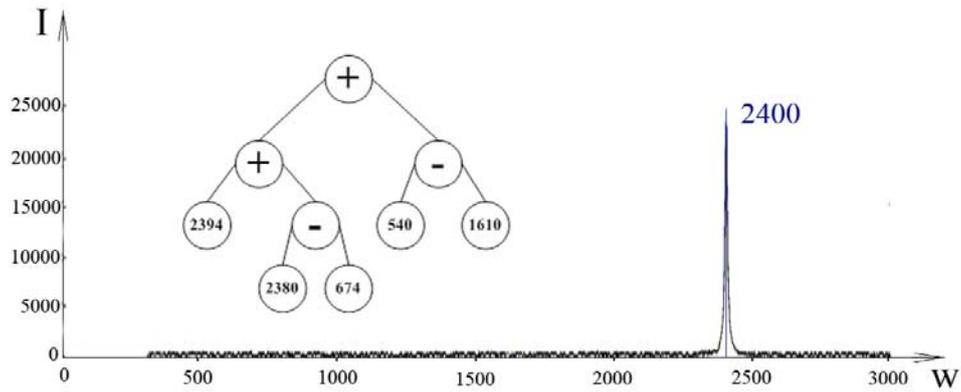


Рисунок 2.1 - Результат для 1-го базового спектра

1-й базовый спектр имеет максимум на частоте 2400 Гц, поэтому в ходе эволюции была получена формула в которой присутствуют частоты близкие к 2400 Гц со знаком «+».

Для 2-го базового спектра:

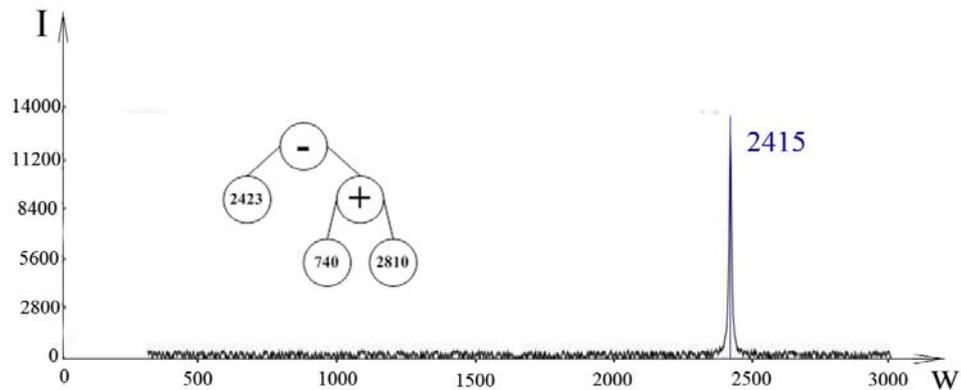


Рисунок 2.2 - Результат для 2-го базового спектра

2-й базовый спектр имеет максимум на частоте 2415 Гц. Он несколько сдвинут вправо относительно максимума 1-го базового спектра. Была выбрана особь в которой со знаком «+» присутствует частота несколько правее максимума, что не дает ложноположительного срабатывания в присутствии первого базового спектра.

Для 3-го базового спектра:

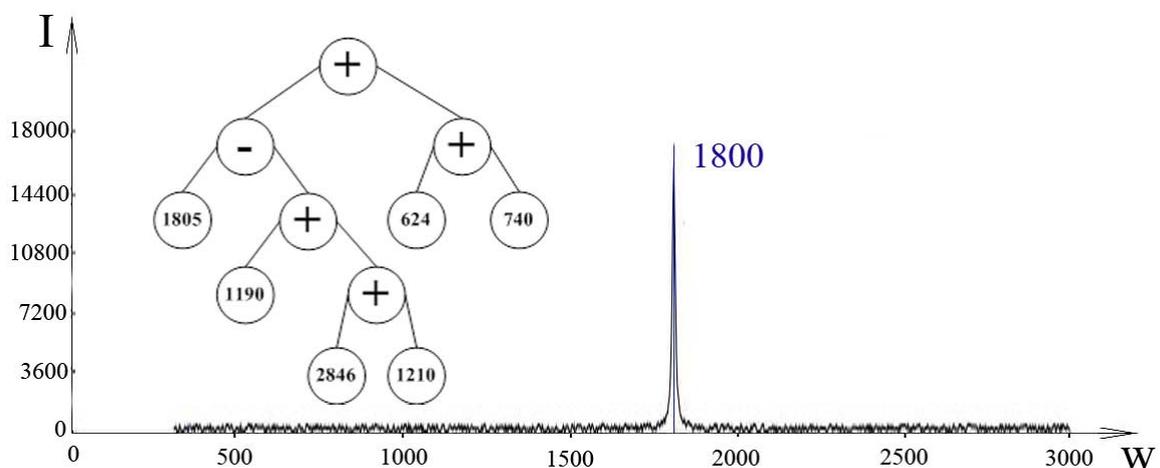


Рисунок 2.3 - Результат для 3-го базового спектра

3-й базовый спектр имеет максимум в районе 1800 Гц. В ходе эволюции была получена особь, имеющая в своей формуле данную частоту. Также любопытно, что формула особи содержит узлы с частотами близкими к 600, 1200 и 2850. Т.к. базовые спектры 4 и 5 имеют максимумы при этих частотах и их присутствие в формуле «защищает» формулу от ложноположительных срабатываний.

Для 4-го базового спектра:

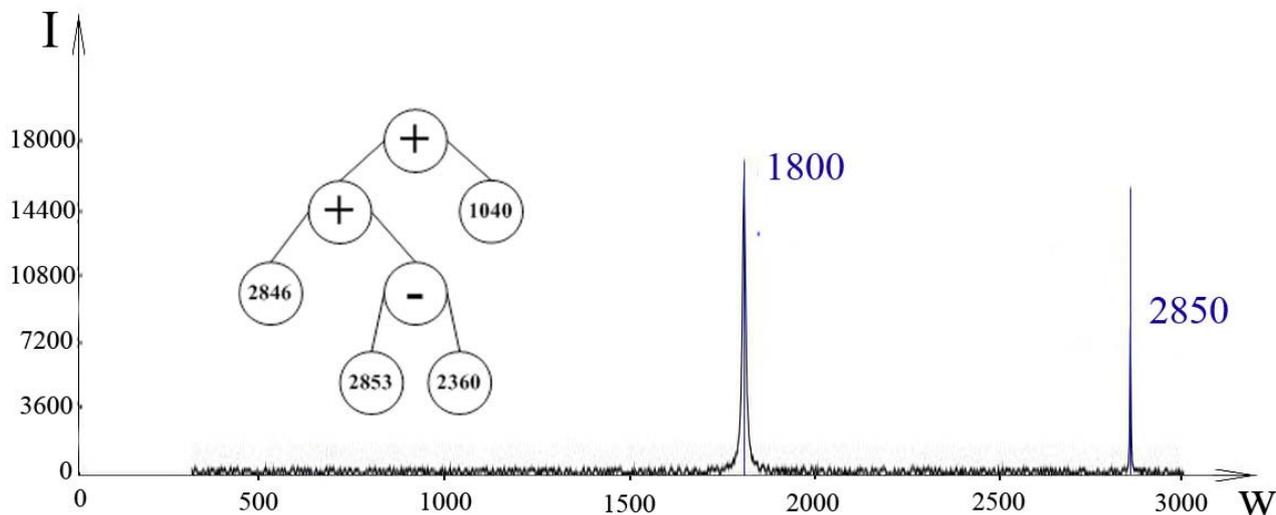


Рисунок 2.4 - Результат для 4-го базового спектра

4-й базовый спектр имеет максимумы в частотах 1800 Гц и 2850 Гц. В полученной особи не присутствует узел с частотой близкой к 1800 Гц. Это можно объяснить тем, что это вело к ложноположительным срабатываниям при присутствии 3-го и 5-го базового спектров, которые также имеют максимум интенсивности при этой частоте.

Для 5-го базового спектра:

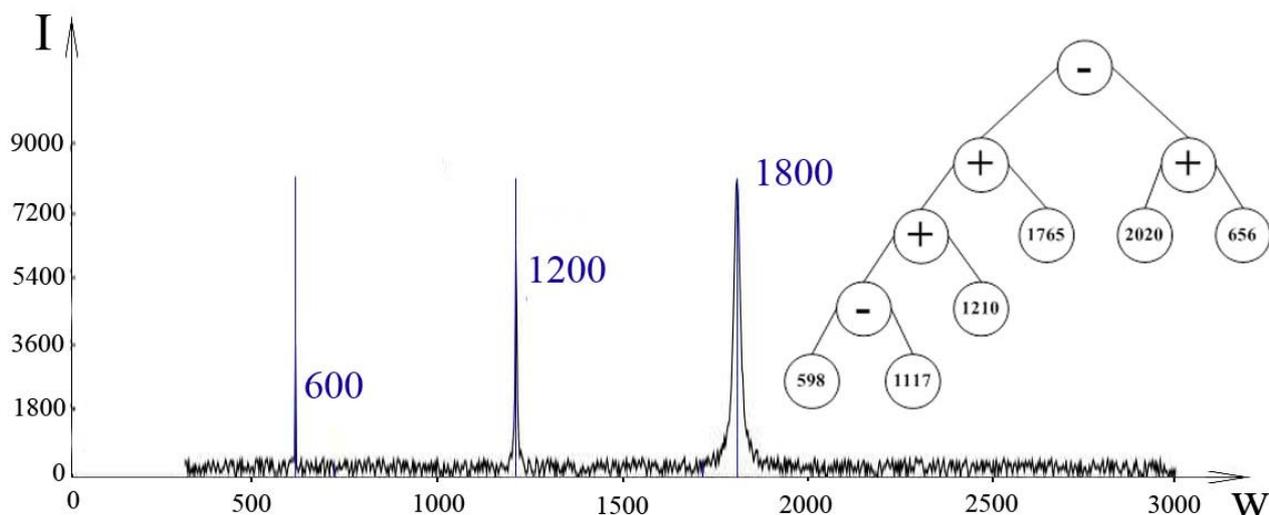


Рисунок 2.5 - Результат для 5-го базового спектра

5-й базовый спектр имеет максимум в точках с частотой 600 Гц, 1200 Гц и 1800 Гц. В ходе эволюции выбрана формула, распознающая спектр по характерным максимумам в районе 600 Гц и 1200 Гц.

2.4 Алгоритм оценки результатов

Оценка результатов моделирования проводится на тестовых спектрах T , полученных как набор из линейных комбинаций базовых спектров B .

Функции из набора лучших особей BO последовательно применяется к каждому спектру из набора тестовых спектров T и в зависимости от результата идет увеличение одного из четырех счетчиков.

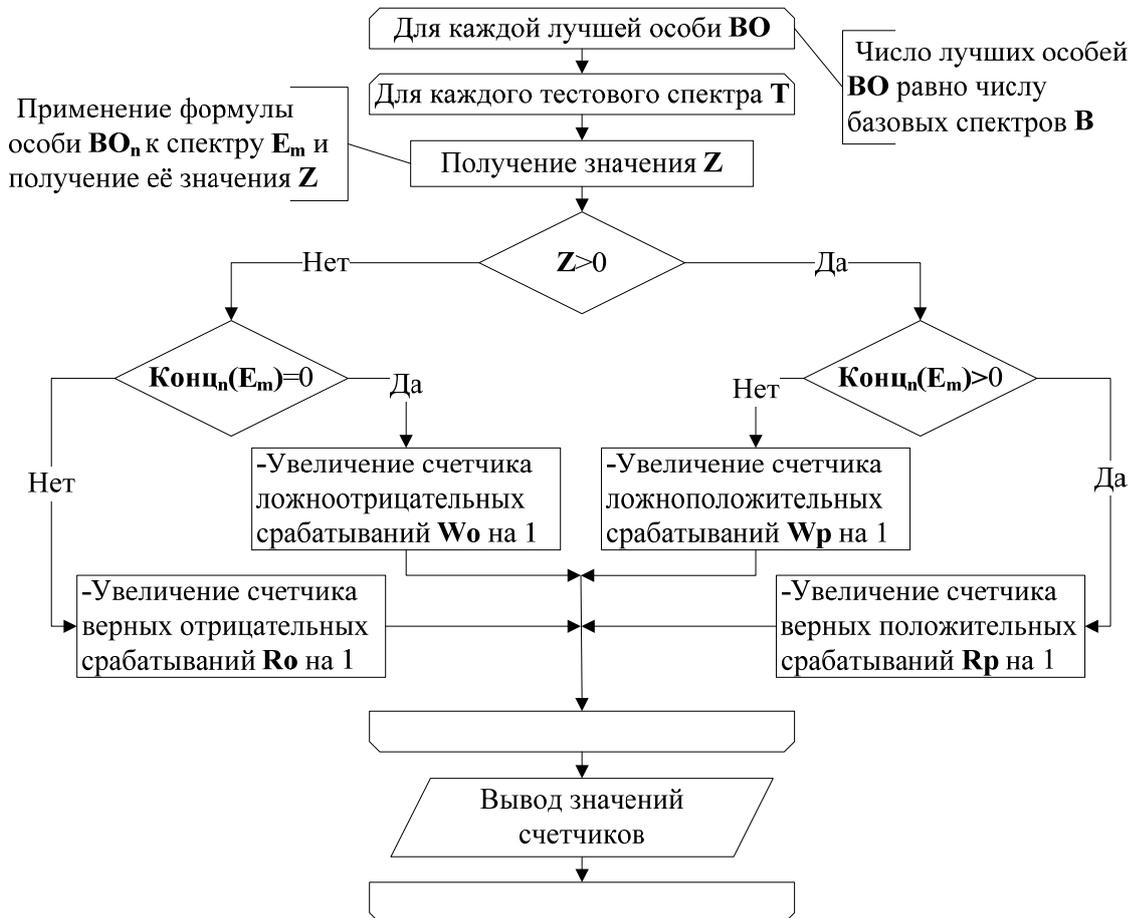


Рисунок 2.6 - Алгоритм оценки результатов моделирования

В ходе тестирования полученных особей проверяется число угадываний и число ошибок при распознавании тестовых спектров. При этом ведется ранжированный учет ложноположительных Wp и ложноотрицательных Wo срабатываний, так как в некоторых случаях один вид ошибки является более критичным, чем другой.

2.5 Результаты моделирования

В результате эксперимента был промоделирован процесс классификации и произведен ранжированный подсчет ложноположительных Wp и ложноотрицательных Wo , а также число верных положительных Rp и верных отрицательных Ro срабатываний для каждой формулы набора особей BO при классификации набора тестовых спектров T . Результаты подсчета представлены в виде диаграмм для каждой особи:

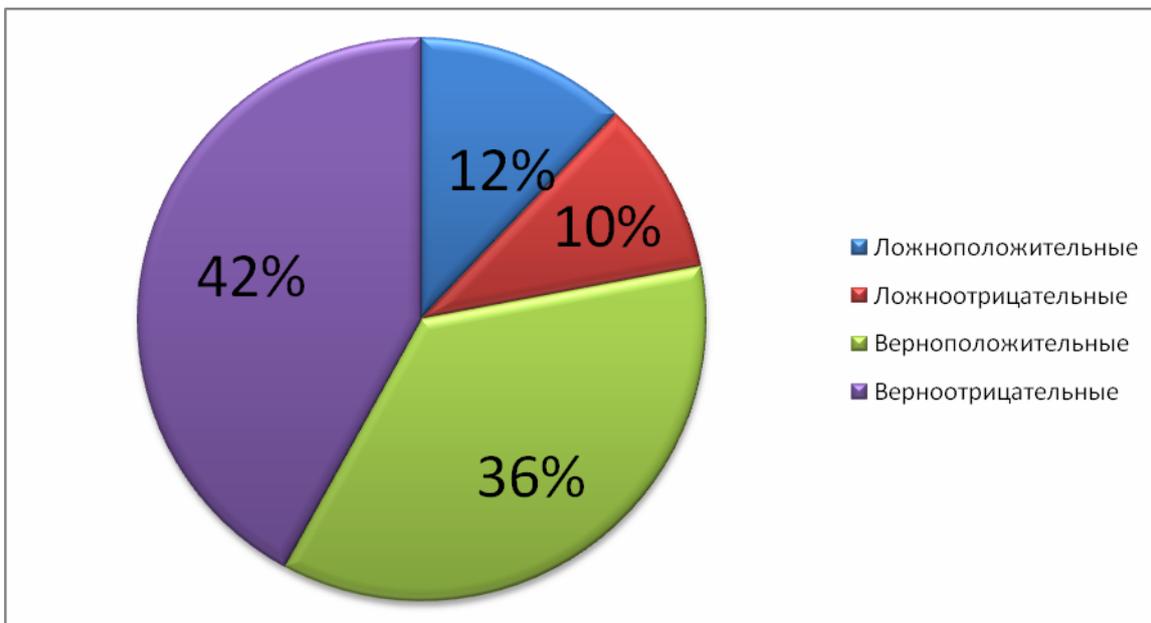


Рисунок 2.7 - Результат классификации для 1-й особи

Рисунок 2.7 иллюстрируют эффективность классификации тестовых спектров 1-й особью набора лучших особей **ВО**.

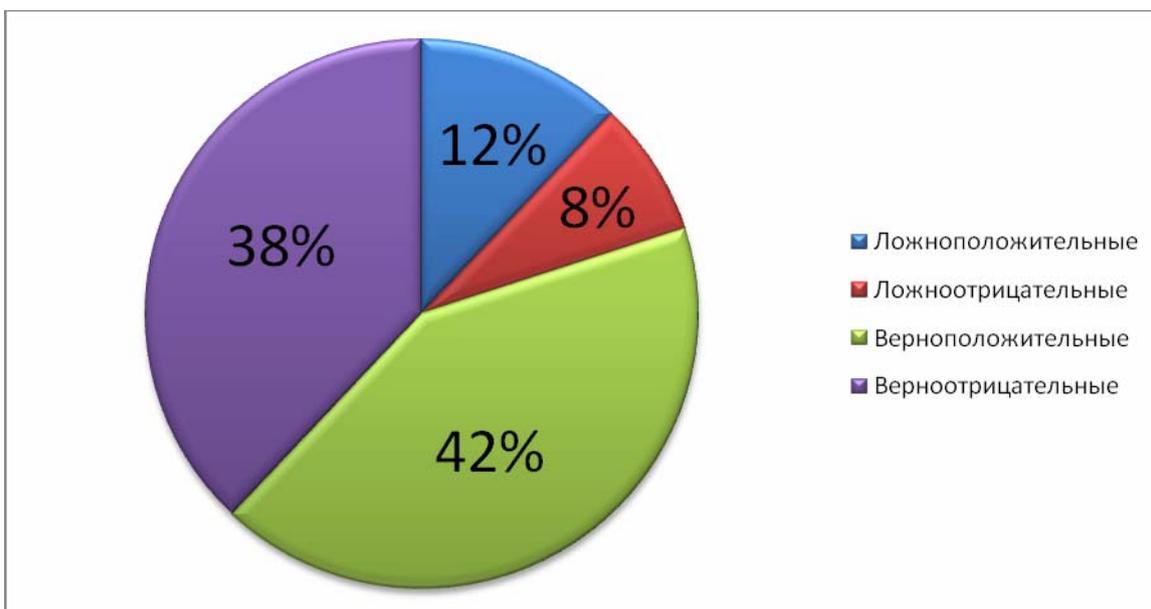


Рисунок 2.8 - Результат классификации для 2-й особи

Рисунок 2.8 иллюстрируют эффективность классификации тестовых спектров 2-й особью набора лучших особей **ВО**.

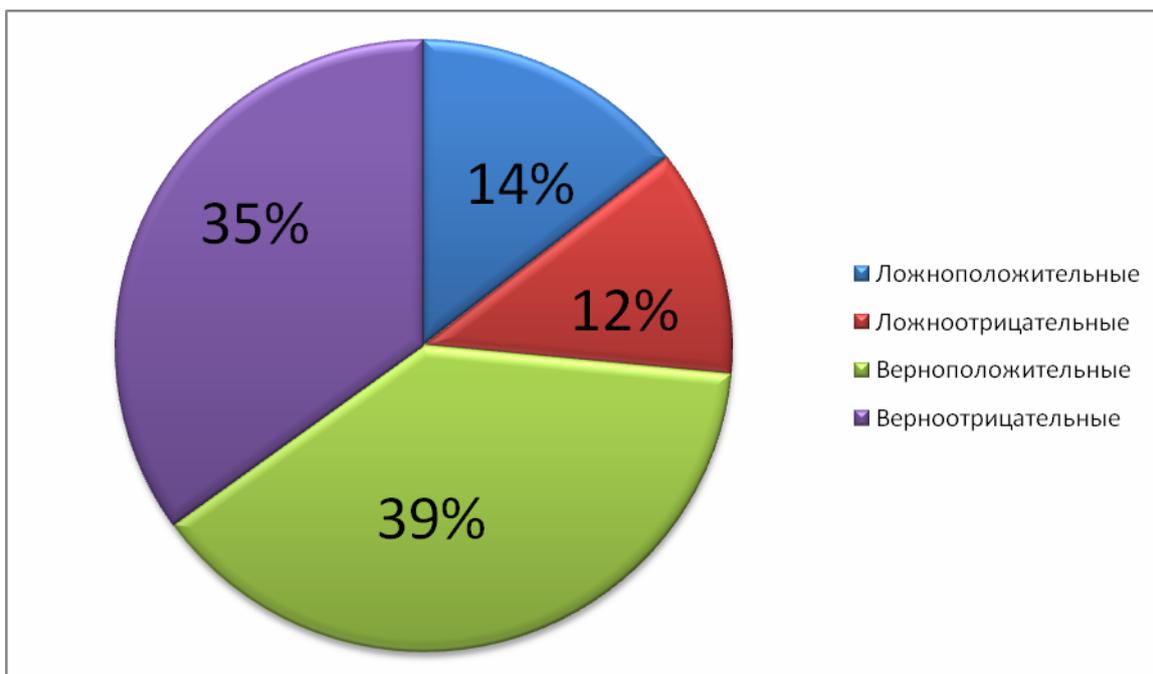


Рисунок 2.9 - Результат классификации для 3-й особи

Рисунок 2.9 иллюстрируют эффективность классификации тестовых спектров 3-й особью набора лучших особей **ВО**.

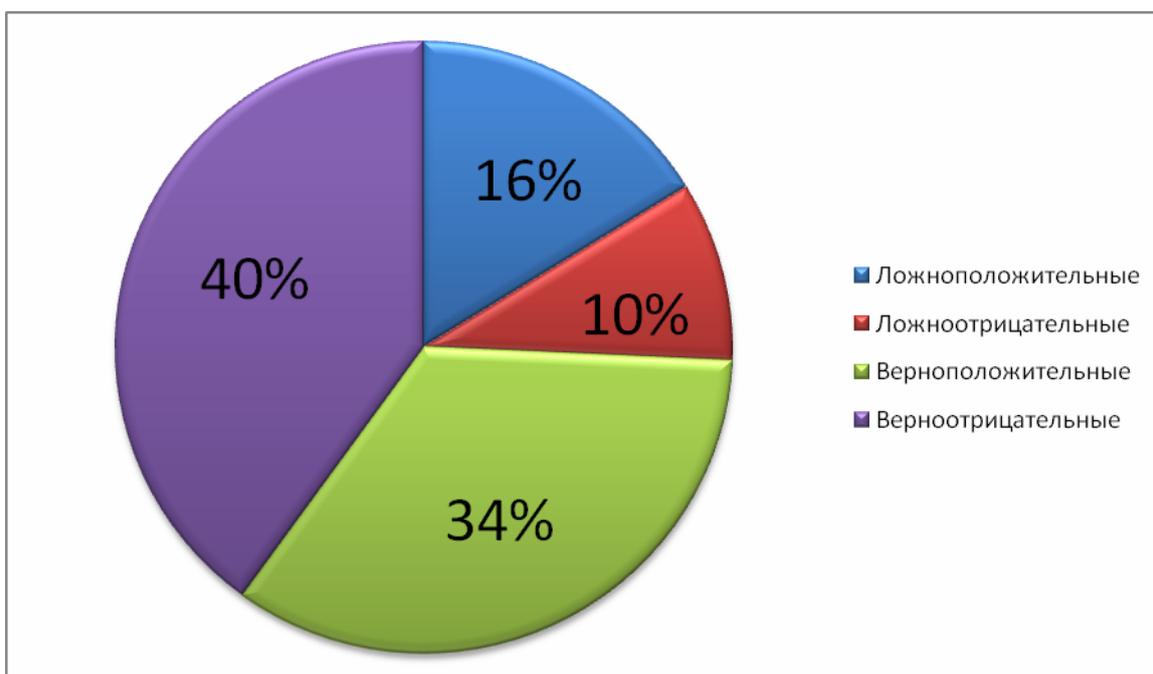


Рисунок 2.10 Результат классификации для 4-й особи

Рисунок 2.10 иллюстрируют эффективность классификации тестовых спектров 4-й особью набора лучших особей **ВО**.

Подводя итоги, можно сказать, что для повышения эффективности моделирования классификации спектров рамановского рассеяния с использованием генетического программирования требуется решение задачи нахождения оптимальных параметров для моделирования, т.к. изменение этих параметров приводит к улучшению или ухудшению процесса классификации.

Заключение

В данной работе был описан метод генетического программирования для классификации спектров рамановской спектроскопии и представлена двухуровневая функция оценки приспособленности, призванная уменьшить риск ошибочной классификации спектров в будущем.

Сгенерированные правила классификации, полученные методом генной эволюции, позволяют формировать решения, учитывающие экспертный опыт оператора. Они являются информативными при совместном анализе с химической структурой компонента, чье присутствие в веществе исследуется. Это обстоятельство выгодно отличает представленный метод от других машинных алгоритмов классификации спектров.

Представленный метод генетического программирования оптимизирует степени уверенности в найденных правилах классификации с тем, чтобы уменьшить риск ошибочной классификации спектров при дальнейшем использовании этих правил. Это является полезным в случаях, когда количество обучающих выборок мало.

В дальнейшем представленный метод предлагается совершенствовать с тем, чтобы определять химическую концентрацию каждого компонента вещества по его спектру рамановского рассеяния.

Также полезным представляется совершенствование функции приспособленности с целью ранжированного учета ложноположительных и ложноотрицательных срабатываний, так как в некоторых случаях один вид ошибки является более критичным, чем другой.

Литература

1. Hennesy K., et al. An Improved Genetic Programming Technique for the Classification of Raman Spectra // Applications and innovations in intelligent systems XII. Cambridge. 2005. 181-192.
2. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 87 с.
3. Yang, J. Honavar, V. Feature subset selection using a genetic algorithm // Intelligent Systems and their Applications, IEEE Vol. 13. Iowa State Univ. 2002. 44-49.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы ГК №02.740.11.0013.

УСТРОЙСТВО ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕМБРАННОГО ТИПА

Нестеров В.А.

Научные руководители: Стешенко В.Б.

*к.т.н., начальник комплекса космической микроэлектроники,
зам ген. конструктора ОАО «Российские космические системы»*

доцент, к.т.н., Власов А.И.

МГТУ им. Баумана, Москва, РФ

DEVICE FOR DIGITAL PROCESSING OF MEMBRAN-TYPE SENSITIVE ELEMENT'S SIGNALS

Nesterov V.A.

Research advisor: docent, Ph.D., Steshenko V.D., docent, Ph.D., Vlasov A.I.

Bauman University, Moscow, RF

Аннотация

В данной работе проведена разработка модуля преобразования сигналов чувствительных элементов датчика давления. В рамках работы приведены структурная, принципиальная и функциональная схемы устройства. Также приведено описание принципиальной схемы устройства. Основное внимание уделено моделированию схемы работы устройства при помощи программного пакета TannerEDA (S-Edit) и сравнению полученных результатов с экспериментальными данными.

Abstract

In this paper the development of the module signal transduction sensors pressure sensor. In the framework of the given structure, the basic and functional scheme of the device. Also describes the concept device. Emphasis is placed on the modeling scheme of the device using a software package TannerEDA (S-Edit) and compared the results with experimental data.

Введение

Тактильные датчики широко применяются в робототехнике, биомедицине, в строительстве и на механических производствах – везде, где необходимо реагировать на физическое прикосновение или давление. На рисунке 1 отображен простой тактильный датчик, обеспечивающий функции включения-выключения, состоящий из двух проводящих слоёв и прокладки между ними. Внутри прокладки сделаны круглые (или любой другой необходимой формы) отверстия. Один из проводящих слоёв заземлён, а второй подключен к нагрузочному резистору. Когда к верхнему проводнику прикладывается внешняя сила над отверстием в прокладке, он прогибается и соприкасается с нижним проводником, тем самым устанавливая с ним электрический контакт, заземляющий нагрузочный резистор. При этом выходной сигнал становится равным нулю, что свидетельствует о приложенной силе.

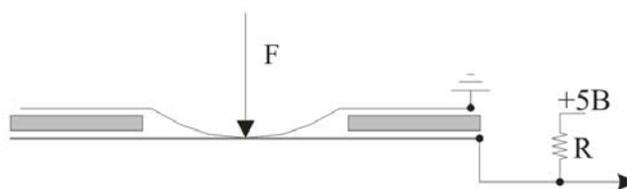


Рисунок 1 – тактильный чувствительный элемент мембранного типа

В ряде случаев требуется контролировать большое количество чувствительных зон, и тогда, для дальнейшей обработки информации, параллельные сигналы с датчиков необходимо преобразовать в один последовательный сигнал. Для решения этой задачи удобно применить сдвиговый регистр и счётчик, разрядность которых соответствует

количеству обрабатываемых входных сигналов. Структурная схема такого устройства показана на рисунке 2.



Рисунок 2 – структурная схема преобразователя параллельного кода в последовательный

32 постоянных сигнала («0» или «1») поступают на вход сдвигового регистра. Один сдвиг происходит по одному тактовому импульсу. Тактовые сигналы подсчитываются 32-х разрядным счётчиком. По приходу 32-ого импульса регистр и счётчик сбрасываются а со входов считывается следующий параллельный код. С выхода схемы поступает преобразованный последовательный код, начало и конец которого обозначается сигналом смены цикла преобразования.

Принципиальная электрическая схема и её особенности

Схема реализована для тридцати двух чувствительных элементов и построена из библиотечных элементов на КМОП-структурах. Сдвиговый регистр, показанный на структурной схеме (рис.2), состоит из D-триггеров, непосредственно обеспечивающих сдвиг информации, и из мультиплексов, позволяющих схеме работать в двух режимах. В первом режиме происходит запись информации с параллельных входов. Во втором режиме происходит преобразование в последовательный код. Для сброса триггеров переключения мультиплексов используется 32-х разрядный счётчик, что максимально увеличивает быстродействие схемы (при тактовой частоте 2 МГц один цикл обработки составляет 80 мкс).

Принципиальная схема всего устройства отображена на рисунке 3.

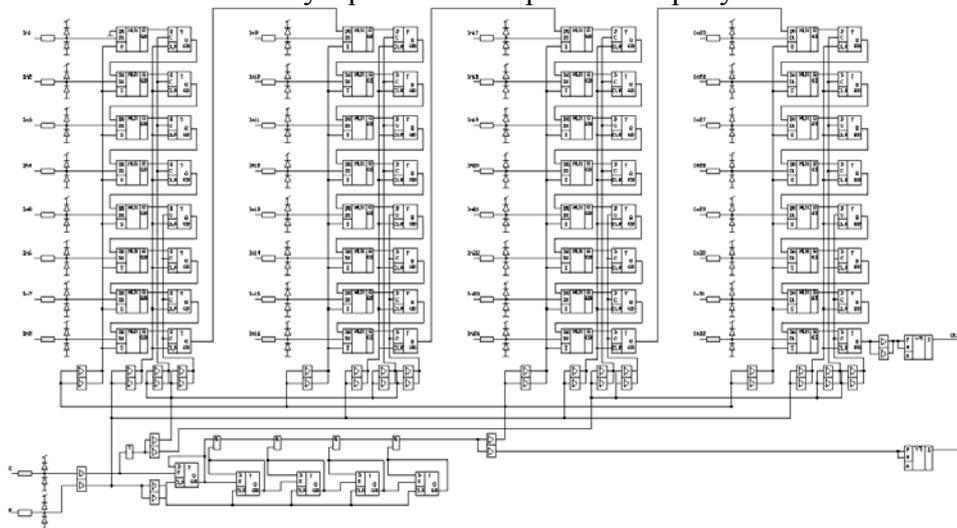


Рисунок 3 – принципиальная схема устройства цифровой обработки сигналов тактильных датчиков

Большое количество буферов в схеме обусловлено нагрузочной способностью МДП-транзисторов – к буферу может быть подключено до 8 входов логических элементов без нарушения функционирования схемы.

Моделирование

Моделирование схемы устройства проводилось в программе S-Edit пакета TannerEDA. На рисунке 4 приведен элемент схемы, обработанной в этой программе.

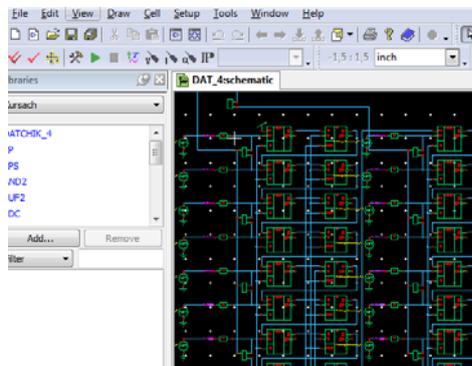


Рисунок 4 - схема моделирования устройства в пакете TannerEDA

Для проверки работоспособности микросхемы осуществлялась проверка в три цикла преобразования:

1 - на первый вход схемы подается логическая «1», на все остальные – логический «0». Таким образом, на выходе микросхемы эта логическая «1» должна появиться на 31 такте (рис.5.а).

2 - на чётные входы подается логический «0», на нечётные – логическая «1». На выходе должен наблюдаться последовательный код из чередующихся «0» и «1», при этом начинающийся с «0» и заканчивающийся «1» (рис.5.б.).

3 - на чётные входы подается логическую «1», на нечётные – логический «0». На выходе должен наблюдаться последовательный код из чередующихся «0» и «1», при этом начинающийся с «1» и заканчивающийся «0» (рис.5.в.). Временная диаграмма проверки схемы показана на рисунке 5.

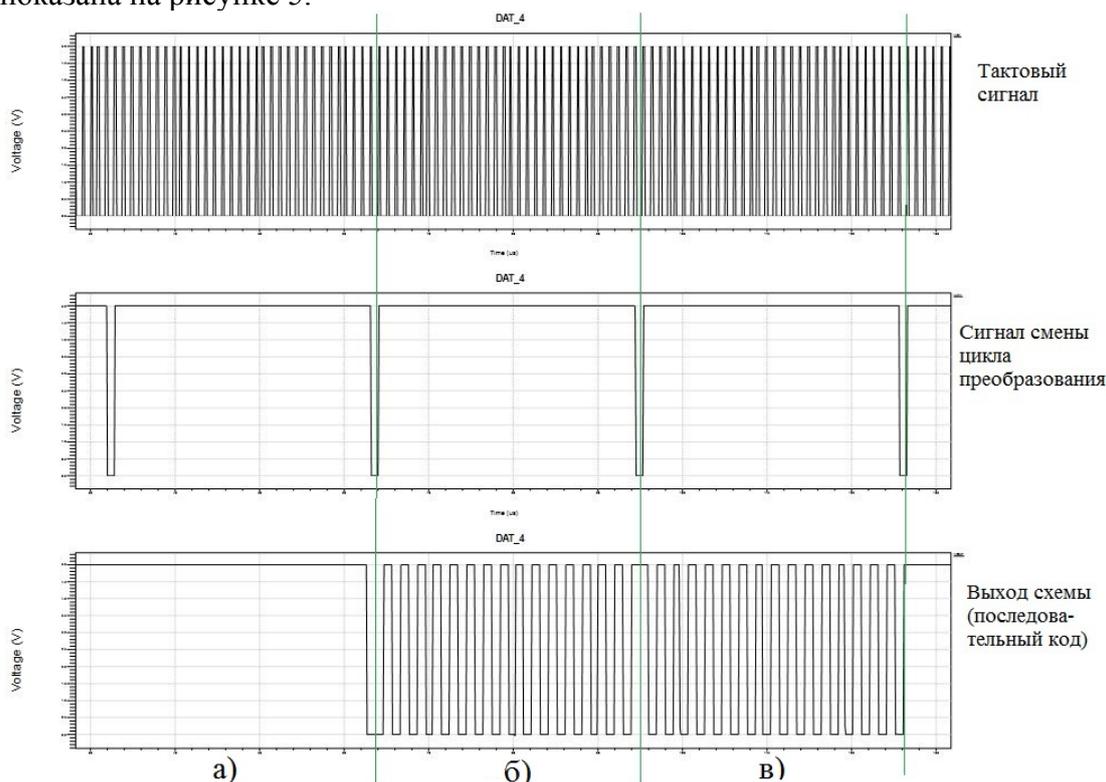


Рисунок 5 - временная диаграмма работы преобразователя сигналов

Реализация на БИС

Для реализации использовался БМК серии 1806 и библиотечные логические элементы на КМОП-структурах с шириной затвора транзисторов 4.5 мкм и длиной затвора 50 мкм, 80 мкм и 200 мкм. Изготовленный кристалл показан на рисунке 6.

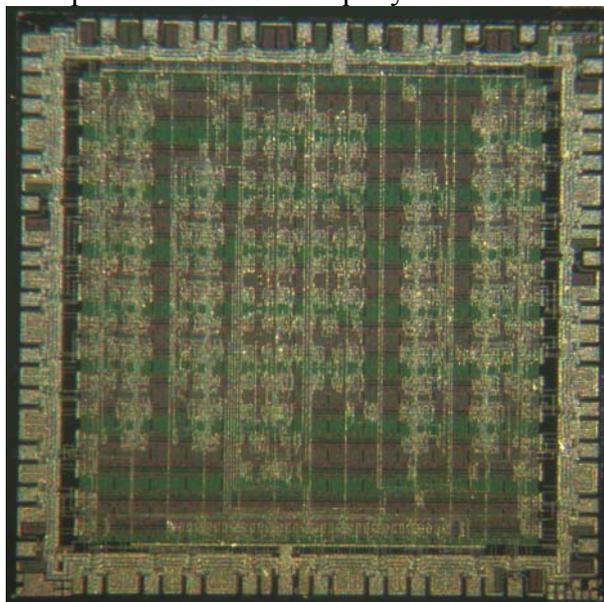


Рисунок 6 – Кристалл микросхемы

Для проверки работоспособности готовой схемы использовалась зондовая станция и определённое программное обеспечение. Тест для проверки был написан при помощи языка высокого уровня (VHDL) где в соответствии названиям входов и выходов ставились номера контактных площадок, задавались входные сигналы и формировались выходные сигналы 2-го уровня, то есть с учётом временных задержек всех логических элементов, используемых в схеме. При помощи зондовой станции на кристалл подаются входные воздействия, а снимаемые выходные сигналы сравниваются со сформированными программой – таким образом отбираются годные и негодные кристаллы.

Выводы

Предложенная схема цифровой обработки сигналов тактильных чувствительных элементов мембранного типа позволяет преобразовать входной параллельный код в последовательный, что существенно упрощает дальнейшую передачу и обработку информации. Реализация схемы на КМОП-структурах в свою очередь позволяет снизить потребляемую мощность, повысить быстродействие, помехоустойчивость и почти полностью использовать напряжение питания.

Литература

1. Новиков Ю.В. Основы цифровой схемотехники. Базовые элементы и схемы. Методы проектирования. - Изд. Мир. 2001.
2. Датчики и сенсоры электронный журнал [<http://datchikisensor.narod.ru/084.html>]. Проверено 28.01.2011.

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ПОКАЗАНИЙ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

П.В. Новиков

Научный руководитель: Власов А.И.

Россия, Москва, МГТУ им. Баумана, кафедра «ИУ-4»

MONITORING SYSTEM OF TEMPERATURE SENSOR FOR VEHICLE

P. Novikov

Scientific supervisor: A. Vlasov

Russia, Moscow, MSTU n. a. Bauman, department "IU-4"

Аннотация

Статья посвящена системе, которая отслеживает температуру охлаждающей жидкости двигателя внутреннего сгорания в реальном времени, тем самым, позволяя реагировать на изменение ситуации, до наступления необратимых последствий. Вычислительной основой системы на аппаратном уровне является одноплатный компьютер «Тион-Про v2». Данную систему можно использовать для контроля температуры охлаждающей жидкости двигателей внутреннего сгорания транспортных средств.

Abstract

The article is devoted to a system which traces temperature of a cooling liquid of an internal combustion engine in real time, thereby is considered, allowing to react to situation change, before irreversible consequences. A computing basis of system at hardware level is the single-board computer «Tion-pro v2». The given system can be used for control of temperature of a cooling liquid of internal combustion engines of a vehicle.

Введение

В России с каждым годом увеличивается число автотранспортных средств. Особенно заметным этот рост стал в последние годы. Но, приобретая автомобиль, мало кто задумывается о той опасности, которой подвергается и подвергает других. На рисунке 1 приведена статистика смертности в результате ДТП в России и в ЕС с 1991 по 2008 г.

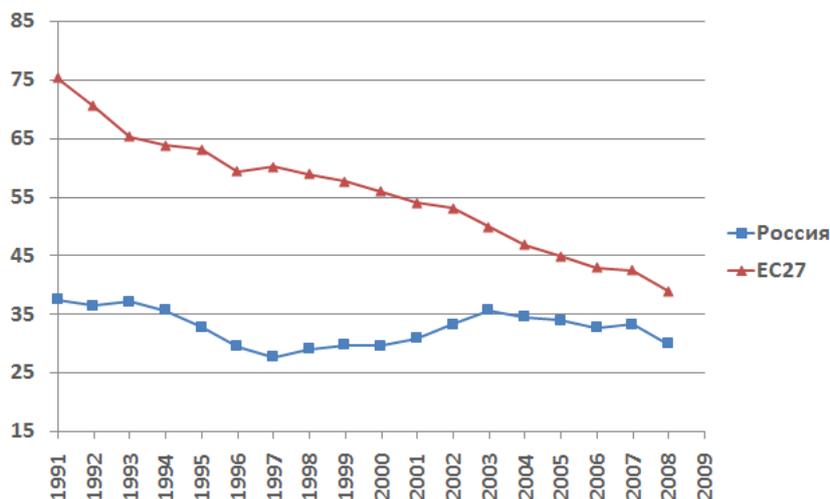


Рисунок 1 - Статистика количества погибших в тысячах в результате ДТП в России (ГИБДД МВД РФ) и ЕС(CARE, 2008) в период с 1991 по 2008 г.

Таким образом, разработчикам в электронной промышленности отводятся задачи по разработке интеллектуальных транспортных систем, как для управления и контролирования транспортных потоков, так и поддержки управления транспортным средством во избежание потенциально опасных ситуаций.

В данной статье рассматривается реализация системы, позволяющей считывать показания с датчика температуры охлаждающей жидкости двигателя внутреннего сгорания транспортного средства, преобразовывать полученные показания в цифровой сигнал,

обрабатывать этот сигнал для представления в удобной для считывания форме. При использовании данной системы на транспортных средствах возможно своевременное предотвращение выхода из строя силовой установки транспортного средства. Так же перегрев двигателя внутреннего сгорания может привести к его возгоранию.

Особенности системы мониторинга на основе одноплатного вычислительного модуля

Разрабатываемая система мониторинга должна обладать следующими отличительными особенностями:

- возможность быстрого и удобного съема информации с датчика температуры охлаждающей жидкости.
- возможность ведения статистики полученных показаний с датчика
- способность работы системы с различными датчиками транспортных средств.
- способность обработки информации полученной с датчиков и представление полученной информации в наглядном виде.
- возможность для расширения системы датчиками других типов, таких как датчики оборотов двигателя транспортного средства, давления масла, органами управления.
- возможность использования различных устройств вывода и ввода, таких как сенсорные панели, мониторы.

Состав аппаратных средств системы мониторинга

Для работы системы мониторинга необходимы аппаратные средства, которые позволят выполнять задачи сбора сигналов с датчика температуры, вывода полученной и преобразованной информации пользователю системы в наглядном виде. Кроме того необходимо, чтобы выбранные средства обладали особенностями приведенными в предыдущем разделе.

В качестве вычислительного модуля был выбран одноплатный компьютер Тион-Про2 компании «Зао-Зео», который представляет собой высоко-интегрированную вычислительно-управляющую систему на базе процессора Cirrus Logic EP9315 с ядром семейства ARM9, способным продолжительное время работать автономно и имеющим развитую инфраструктуру [1].

Для преобразования аналоговых сигналов с датчика температуры охлаждающей жидкости в цифровые необходим модуль АЦП. Для реализации данной функции в данной системе используется «Плата ввода/вывода» компании «Зао-Зео». Данный модуль полностью совместим с выбранным ранее вычислительным модулем, так же позволяет подключать до четырех датчиков к выходам АЦП со съёмными резистивными делителями и до десяти контактных датчиков. Так же присутствуют восемь выходов для управления реле.

В качестве датчика температуры охлаждающей жидкости используется термометр сопротивления компании «Febi», который устанавливается в автомобили Chevrolet, Daewoo, Opel, Vauxhall [2].

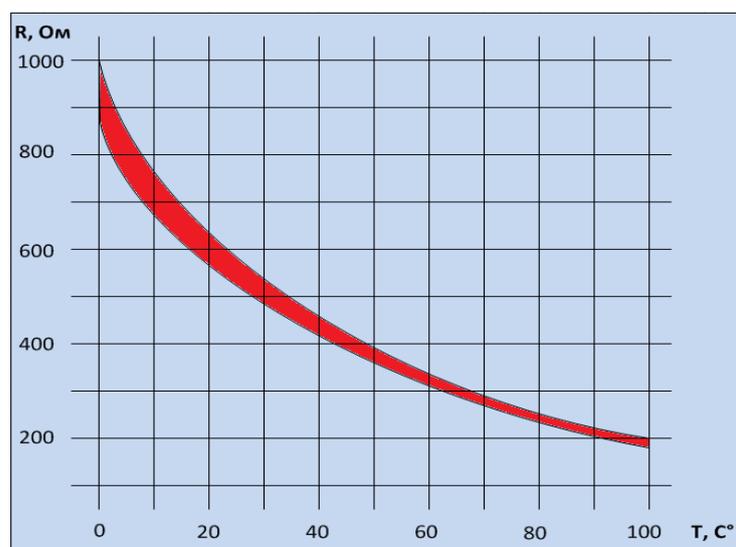


Рисунок 2 - График зависимости сопротивления от температуры используемого термометра.

Термометр сопротивления - это термометр, как правило, в металлическом или керамическом корпусе, чувствительный элемент которого представляет собой резистор, выполненный из металлической проволоки или пленки и имеющий известную зависимость электрического сопротивления от температуры. Зависимость сопротивления от температуры для используемого датчика температуры представлена на рисунке 2, получена экспериментально [3].

Программное обеспечение

При разработке подобных систем на схожих аппаратных платформах, как правило, применяются операционные системы с несколько урезанными возможностями, но вполне достаточными, для выполнения большинства задач. Главными же достоинствами таких операционных систем является их низкие аппаратные требования и невысокая цена продажи. В данном проекте используется операционная система Embedded Linux. [2]

Кроме того, для реализации данного проекта существует еще несколько важных аспектов, такие как:

- компиляция исходных кодов операционной системы Embedded Linux для поддержки модуля АЦП/ЦАП, а так же средств разработки.
- компиляция исходного кода разработанной системы мониторинга под процессор одноплатного вычислительного модуля Тион-Про, ARM9;
- отображение графики в операционной системе Linux для встроенных систем без X Window System - оконной системы, обеспечивающей стандартные инструменты и протоколы для построения графического интерфейса пользователя;
- настройка взаимодействия системы с пользователем

Для решения первой задачи потребуются исходные коды ядра операционной системы, необходимый набор дополнений, называемый «патчем», и операционная система Linux, в которой возможно скомпилировать исходные коды требуемой операционной системы. Для поддержки модуля АЦП/ЦАП требуется произвести коррекцию файла конфигурации исходных кодов.

Для решения второй задачи достаточно корректно настроить соответствующий компилятор, arm-linux-g++, и собрать на основе исходного кода исполняемый файл, который в последствии будет запущен на одноплатном вычислительном модуле.

Для решения третьей и четвертой задачи требуется более детальный и внимательный подход. Как уже было сказано выше, Linux для встраиваемых систем не оснащен системой X Window System, которая обеспечивает базовые функции графической среды: отрисовку и

перемещение окон на экране, взаимодействие с мышью и клавиатурой. В таком случае необходимо использовать фреймбуфер.

Для создания программы с графическим интерфейсом, способным отрисовываться через фреймбуфер было принято решение использовать набор библиотек Qt for Embedded Linux [4].

На рисунке 3 представлена структурно-функциональная схема разрабатываемой системы мониторинга.

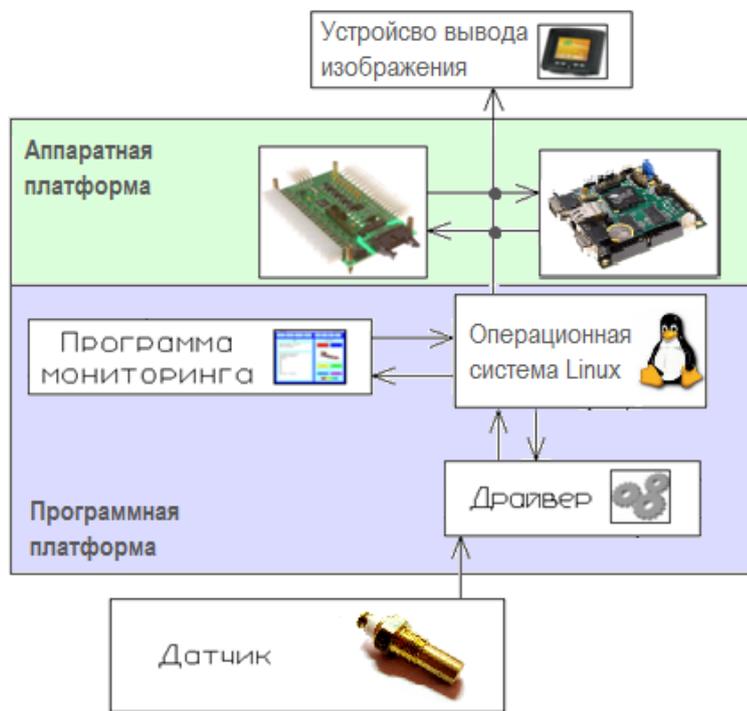


Рисунок 3 – Структурно-функциональная схема системы мониторинга.

Выводы

Предложенная система мониторинга позволяет проводить отслеживание температуры охлаждающей жидкости двигателя транспортного средства в реальном времени. В зависимости от полученных значений, может предупреждать пользователя о возможных неполадках. При незначительной переконфигурации систему можно расширить дополнительными датчиками и управляющими реле.

Литература

1. ЗАО "Завод Электрооборудования" [Электронный ресурс] : Компания ЗАО "Завод Электрооборудования", Москва 2011. Реж. доступа: <http://www.zao-zeo.ru/>
2. Febi [Электронный ресурс] : Общество Ferdinand Bilstein GmbH + Co KG, г. Ennepetal Germany 2011. Реж. доступа: <http://www.febi.com>
3. Олейник, Б. Н. Приборы и методы температурных измерений : учеб. пособие для сред. спец. учеб. заведений по спец. "Электротеплотехн. измерения" / [Б. Н. Олейник, С. И. Лаздина, В. П. Лаздин, О. М. Жагулло] .— М. : Изд-во стандартов, 1987 .— 296 с.
4. Qt – A cross-platform application and UI framework [Электронный ресурс] : Компания Nokia Corporation, USA, 2010. Реж. доступа: <http://qt.nokia.com/>

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ В ЗАДАЧАХ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Пашинский И.О.

Научный руководитель: Юдин А.В.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра ИУ4

INTELLECTUAL CONTROL SYSTEM OF THE ELECTRIC DRIVE IN THE TASKS OF NAVIGATION OF MOBILE ROBOT

Pashinsky I.O.

Научный руководитель: Yudin A.V.
MSTU named after N.E. Bauman, IU4 department

Аннотация

Работа посвящена вопросам разработки микропроцессорной системы управления электроприводом ходовой части робота. Рассмотрено математическое описание алгоритма работы системы. Разработаны структурные и принципиальные схемы системы управления. Разработана общая архитектура и реализация необходимого программного обеспечения. Особое внимание уделено цифровой обработке множественной внешней информации (с различных датчиков), а также диагностированию, настройке работы системы в конкретных режимах. Изготовлен действующий макет системы, проведены испытания.

Abstract

This work is dedicated to questions of development of a microprocessor control system electric chassis robot. I have considered the mathematical description of algorithm of work of system is considered. Structural and control system circuit diagrams are developed. The general architecture and realization of the necessary software is developed. Particular attention is paid to the digital processing of multiple external information (from different sensors), as well as diagnostics, configuration of the system in specific modes. The operating breadboard model of system is made, tests are conducted.

Введение

В современном мире роботы занимают все более значимое положение. Они находят применение в самых различных областях: военном деле, производстве, науке, медицине и даже в образовании. И во всех отраслях роботы должны быть подвижны, мобильны. Поэтому задачи точного управления электроприводами исполнительных механизмов, в частности электроприводом ходовой части, очень важны.

В данной статье рассматривается система управления электроприводом ходовой части робота, обеспечивающая постоянство частоты вращения вала электродвигателя. Электропривод ходовой части робота зачастую не имеет системы управления частотой вращения, поэтому при увеличении нагрузки на валу падает частота вращения и, соответственно скорость передвижения. По некоторым оценкам, мобильные роботы, участвующие в соревнованиях, проводимых международной ассоциацией Eurobot, теряют до 10 % времени, выделенного на задачу, именно за счет неэффективного управления электродвигателями ходовой части. Разработанная система управления стабилизирует частоту вращения, помогает минимизировать потери скорости и времени, что позволяет повысить эффективность действия робота. На основе данной системы можно разрабатывать наиболее эффективные алгоритмы управления электроприводом.

В современных устройствах применяются следующие методы стабилизации частоты вращения:

- 1) Ступенчатое регулирование
- 2) Механическое регулирование
- 3) Цифровое регулирование

Из всех вышеперечисленных методов регулирования наиболее точным, быстродействующим и надежным является цифровой метод регулирования, и, конкретно, алгоритм работы пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (далее ПИД). Он достаточно надежен, обеспечивает наивысшую точность стабилизации и обладает наибольшим

быстродействием при правильно подобранных коэффициентах регулирования. Как раз задачу подбора оптимальных коэффициентов регулирования решает блок настройки/диагностики. Особенность разработанной системы заключается в оптимальной настройке параметров регулирования с помощью разработанного программного обеспечения. Сочетание в данном подходе правильно настроенного ПИД-регулятора, алгоритм которого заложен в микропроцессорную систему, и блока диагностики позволяют достичь оптимальной производительности.

Структурная схема системы

Структурная схема системы управления показана на рис. 1.

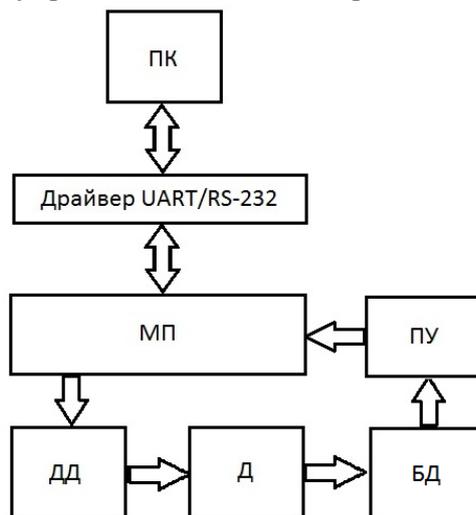


Рисунок 1 - Рассмотрим принцип работы системы

Микропроцессор (МП), используя блок ССР, формирует сигнал широтно-импульсной модуляции (далее ШИМ) и подает его на драйвер двигателя (ДД). Драйвер двигателя увеличивает амплитуду и мощность принятого сигнала и передает его на электродвигатели привода (Д). Роторы электродвигателей приходят во вращение, и блок датчиков (БД) считывает текущее значение частоты вращения. БД – это массив датчиков различной физической природы. Кроме контура управления по частоте, БД реализует контуры управления по току, по скорости робота, однако за базовый контур берется контур по частоте вращения вала двигателя, именно он наиболее полно рассмотрен. Дополнительные контуры позволяют при регулировании учитывать особенности не только режима работы, но и особенности самого электродвигателя. В зависимости от вида применяемого датчика он преобразует некоторую величину, характеризующую величину частоты вращения вала двигателя, в соответствующий ей электрический сигнал. Выработанный электрический импульс передается на преобразователь уровня (ПУ). ПУ корректирует ШИМ сигнал (изменяет амплитуду импульса, осуществляет фильтрацию, сглаживание). В случае если импульс не нуждается в обработке, блок ПУ можно исключить. Затем обработанный сигнал подается на микропроцессор (МП). МП, с помощью блока ССР, выполняет захват импульса, например по нарастающему фронту, и определяет период импульса, вычисляет значение частоты. Но в задачах навигации скорость вращения вала двигателя не всегда напрямую связана с текущей скоростью робота (пробуксовка, занос). МП, используя алгоритм работы ПИД-регулятора, вырабатывает управляющий сигнал, который передается на блок ДД. И процесс повторяется. Система имеет интерфейс для связи с персональным компьютером ПК. Драйвер UART/RS-232 выполняет преобразование уровней сигналов UART в RS-232. Сигналы с драйвера поступают на COM-порт. Использование RS-232 удобно, т.к. в настоящее время широко распространены переходники RS-232-USB, это позволяет использовать связь с компьютером, даже если он не имеет последовательного порта. ПК,

используя соответствующее программное обеспечение, обрабатывает сигналы, поступившие от системы. Интерфейс связи с ПК значительно расширяет возможности системы, это и возможность управления двигателем с компьютера, контроль параметров, и самое главное: появляется возможность диагностирования системы, оценка применимости настроек регулятора для данного режима работы, корректировка при необходимости.

Модуль «Датчик частоты»

Датчик частоты служит для преобразования некоторой величины, зависящей от частоты вращения, в электрический сигнал. В схеме я использую трехканальный оптопрерыватель. Он обладает высокой точностью измерения частоты и возможностью определения направления вращения. На валу неподвижно закреплен непрозрачный диск с отверстием. Когда при вращении вала диск поворачивается прорезью к оптопрерывателю, оптопрерыватель вырабатывает прямоугольный импульс. Период вырабатываемого импульса равен периоду вращения вала. И далее импульс поступает на блок ПУ.

Также для определения частоты можно использовать датчик Холла, например АН211. Можно использовать дополнительные датчики, имеющие другую природу отсчета скорости. Например, датчики, непосредственно не связанные с валом двигателя, аналог лазерной «мышки».

Математическое описание ПИД-регулятора

В общем виде ПИД-регулятор имеет передаточную функцию вида: $W(p) = K_p + \frac{1}{T_i} + T_d$,

ей соответствует дифференциальное уравнение:

$$W(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d \cdot \left(\frac{d}{dt} \varepsilon(t) \right),$$

где $\varepsilon(t)$ - сигнал рассогласования, $W(t)$ - выходная величина регулятора, K_p – коэффициент передачи пропорциональной части регулятора, T_i – постоянная времени интегрирования, T_d – постоянная времени дифференцирования.

Переходим к рекуррентной формуле. Заменим производную на разность первого порядка, а интеграл будем рассчитывать с помощью метода трапеций.

$$W(n) = K_p \cdot \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \left[\left(\frac{\varepsilon(0) + \varepsilon(n)}{2} \right) + \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon(i) \right] \cdot T + \frac{T_d}{T} \cdot (\varepsilon(n) - \varepsilon(n-1))$$

$$W(n) = K_p \cdot \varepsilon(t) + \frac{T}{T_i} \cdot \left[\left(\frac{\varepsilon(0) + \varepsilon(n)}{2} \right) + \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon(i) \right] + \frac{T_d}{T} \cdot (\varepsilon(n) - \varepsilon(n-1))$$

Величина поправочного члена $\Delta u(n)$:

$\Delta u(n) = u(n) - u(n-1)$, отсюда рассчитаем текущее значение управляющего сигнала.

$$u(n) = u(n-1) + \Delta u(n) \quad (1)$$

Подставив в формулу (1) предыдущее значение управляющего сигнала и величину поправочного члена, рассчитаем текущее значение величины управляющего воздействия.

$$u(n) = u(n-1) + K_p \cdot (\varepsilon(n) - \varepsilon(n-1)) + \frac{T}{T_i} \cdot \left(\frac{\varepsilon(n) + \varepsilon(n-2)}{2} \right) + \frac{T_d}{T} \cdot (\varepsilon(n) - 2\varepsilon(n-1) + \varepsilon(n-2))$$

По данному математическому описанию был разработан алгоритм работы микропроцессорной системы.

Алгоритм работы микропроцессорной системы

На рис. 2 представлен алгоритм работы микропроцессорной системы, основной и фоновой программ соответственно.



Рисунок 2 – Алгоритм работы микропроцессорной системы

Программа для микропроцессора ATmega128 написана на языке C.

Диагностика и настройка системы

Суть диагностики системы сводится к следующему: передача частоты вращения вала и скважности ШИМ на компьютер по RS-232 и обработка принятых данных с помощью разработанного ПО. По принятым данным программа строит графики, по ним оператор может оценить применимость настроек системы для данного режима работы. При необходимости он может запустить программу для настройки системы. Суть алгоритма программы настройки заключается в подборе оптимальных коэффициентов регулирования на основе полученной характеристики работы системы в определенном режиме. Программа оценивает быстроту регулирования, точность. На рис. 3 приведен результат работы программы настройки.

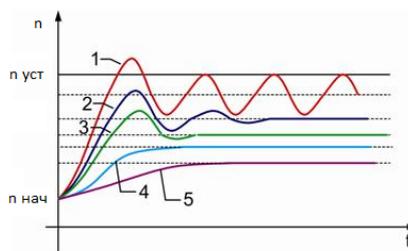


Рисунок 3 – Переходные характеристики системы, при различных настройках

До настройки характеристикой системы был график 2. В переходной характеристике наблюдаются затухающие колебания. Быстродействие и точность несколько снижены. Программа настройки прошла весь расчетный диапазон коэффициентов, и получила характеристику 3. В переходной характеристике 3 наблюдаются небольшой выброс и быстро затухающие колебания (1-2 периода). Этот тип переходной характеристики обеспечивает хорошее быстродействие и быстрый выход на заданную частоту вращения.

Разработанное ПО существенно уменьшает время пуска/наладки системы, значительно повышает качество работы системы в целом.

Результат работы

В ходе проведенной работы были разработаны микропроцессорная система управления, необходимое программное обеспечение, изготовлен действующий макет системы. Проведены испытания работы системы, протестирована работа ПО на практике, проведена диагностика и настройка системы. Данная система обладает высокой работоспособностью, надежностью, приемлемыми характеристиками. Выбранный подход для решения задачи себя полностью оправдал. В дальнейшем планируется усовершенствовать данную систему.

Литература

1. Гостев В.И. Системы управления с цифровыми регуляторами. Справочник. - К.: «Техника», 1990. – 280 с.: ил.
2. Шпак Ю.А. Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров. – К.: «МК - Пресс», 2006. – 400 с.: ил.

ELECTROSTATIC LOW-FREQUENCY ENERGY HARVESTER

Sattarov M., Skotnikov S., Tazabekov O., Yakimets D.

Research supervisors: Prof. Pierluigi Civera

Polytechnic Institute of Turin, Italy

Abstract

Each electronic device requires power source for it's operating. It could be a nice idea to harvest energy from the device itself. The main problem, that normally oscillation frequency of such a structure is relatively low. There is an energy harvester presented here, which works at low (112Hz) frequency. It's based on electrostatic energy generators. The total output power of such a device according to the calculations is about 21nW.

Introduction

The essential part of every micro-system is the source of the energy required for its functioning. While the energy can be generated by the conventional methods we can also use a particular MEMS structure to create a source of renewable energy for micro-systems.

The functioning of the device is based on the conversion of the mechanical vibrations into electrical energy. There are multiple ways of converting mechanical energy into the electric energy and in this project the electrostatic energy generator is used. The principle of such generators is that the moving part of the transducer moves against an electrical field, thus generating energy.

Theoretical model Conversion mechanisms

There are three basic mechanisms by which vibrations can be converted to electrical energy: electromagnetic, electrostatic, and piezoelectric. In the first case, the relative motion between a coil and a magnetic field causes a current to flow in the coil. Electrostatic generation consists of two conductors separated by a dielectric (i.e. a capacitor), which move relative to one another. As the conductors move the energy stored in the capacitor changes, thus providing the mechanism for mechanical to electrical energy conversion. Finally, mechanical strain in a piezoelectric material causes a charge separation across the material (which is a dielectric), producing a voltage. Table 1 gives a qualitative comparison of the merits of conversion mechanisms [1].

Table 1. Comparison of the relative merits of three primary types of converters

Mechanism	Advantages	Disadvantages
Piezoelectric	No voltage source needed Output voltage is 3–8 V	More difficult to integrate in microsystems
Electrostatic	Easier to integrate in microsystems	Separate voltage source needed Practical difficulties
Electromagnetic	No voltage source needed	Output voltage is 0.1–0.2 V

It could be good idea to develop device using existing technology. So, it is based on Tronic's or MultiMEMS technology processes. That's why it's better to choose electrostatic transduce method, because there is a standard Tronic's process of developing comb drive.

Examination of electrostatic generator

Meninger et al. [2] of MIT presented an electrostatic generator that employs a variable micro-machined capacitor in 2001. Two different designs were studied: a parallel capacitor operated with a constant charge and a comb capacitor operated with a constant voltage. If the charge on the capacitor is maintained constant while the capacitance decreases (e.g. reducing the overlap area of the plates or increasing the distance between them), the voltage will increase. If the

voltage on the capacitor is maintained constant while the capacitance decreases, the charge will decrease [Fig. 1].

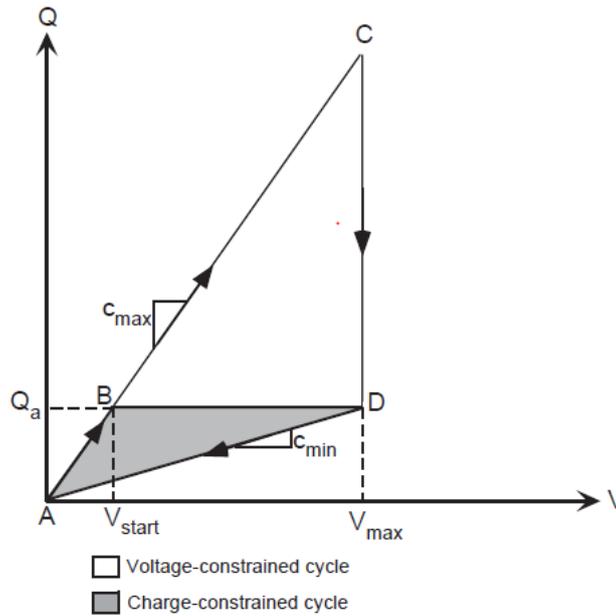


Figure 1. Diagram explaining electrostatic energy conversion [3]

The charge constrained conversion cycle starts when the micro-machined capacitance (given by the slope of the Q-V curve) is maximum. At this moment, a voltage source charges the MEMS capacitor to an initial voltage, V_{start} , that has a smaller value than V_{max} , and therefore the cycle conversion goes from point A to point B. The path B-D corresponds to the plates moving from maximum capacitance, C_{max} , to minimum capacitance, C_{min} with constant charge, Q_0 . As the capacitor decreases and charge is maintained constant, the voltage increases its value. The charge is returned to the reservoir in path D-A. The net energy out is equal to the area A-B-D.

$$E = \frac{1}{2}(C_{max} - C_{min})V_{max}V_{start}$$

The energy gained in the conversion process is pumped from the MEMS capacitor along path D-A for both charge and voltage constrained cycle. As shown graphically, the mechanical energy converted into electrical energy is greater if the voltage across the capacitor is constrained than if the charge across the capacitor is constrained. However, the initial voltage source needed has a smaller value for the constant charge case. The disadvantage of this solution is that the initial voltage source has to increase its value.

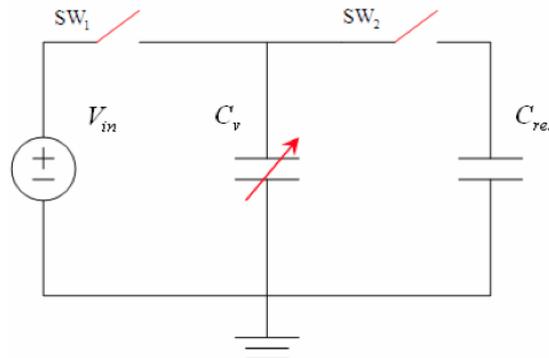


Figure 2. Schematic circuit of a capacitive converter [4]

As explained, the proper operation of the switches, or when the charges are transferred, is critical for a good efficiency. The operation of the switches must be synchronized with the mechanical oscillation. The frequency of the mechanical oscillation depends on the resonance

frequency of the mechanical structure. For best results, then, the mechanical source must have a vibration with a frequency close to that of the resonance frequency of the transducer.

Review of harvester's mechanical properties

In order to be able to evaluate the conversion of electrical energy in the harvester we need at first to determine its movement equation, which is a factor of the geometry of the MEMS device. We will start by using the general approximation of the system, followed by a resolution of the movement equations to determine the movement model. We will use MathCAD analysis to solve the final differential equation.

We start our study of the MEMS vibration by examining the general model of the device. In this model, first elaborated by Williams and Yates we substitute the complicated MEMS design by a simple mass-spring-damper system. The whole system vibrates due to the external input, which is the vibration we're tuned to catch, which we call $y(t)$. The inside of the system consists of the mass itself, connected to the outside by the springs as well as a damper, which we separate in mechanical and electrical one [Fig. 3].

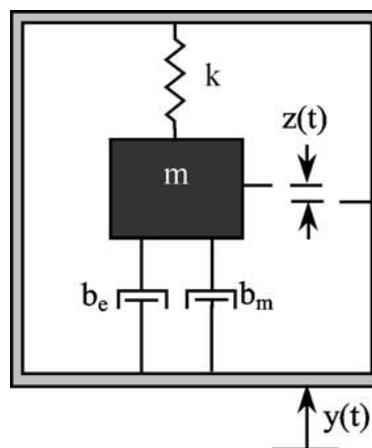


Figure 3. Schematic of generic vibration converter [1]

This is a usual model for the mechanical-to-electric converter system. The equation of motion of such system is simply:

$$m \cdot z'' + (b_e + b_m) \cdot z' + kz = -my''$$

We will now solve this equation to obtain the motion of the mass. First we use the Laplace Transform with following substitutions:

$$y(t) = Y(s); z(t) = Z(s); z'(t) = sZ(s); z''(t) = s^2Z(s);$$

From it we obtain directly:

$$Z(s) = \frac{-ms^2}{ms^2 + (b_e + b_m)s + k} \cdot Y(s)$$

We can now introduce the parameters depending on the resonant frequency of the system which is defined as:

$$\omega_n = \sqrt{k/m}$$

Therefore we can make the following substitutions for damping and spring constant variables:

$$k = \omega_n^2 \cdot m$$

$$b_{e,m} = 2m \cdot \omega_n \cdot \varepsilon_{e,m}$$

Where we replace the damping coefficients by respective damping ratios. At the same time we can now pass into the Fourier frequency domain.

The result that we obtain in simplified state is:

$$|Z(j\omega)| = \frac{m\omega^2}{-m\omega^2 + 2(\epsilon_g + \epsilon_m) \cdot j\omega \cdot \omega_n + \omega_n^2} \cdot |Y(j\omega)|$$

In these equations the value of k is related to the spring coefficient of the beams supporting the mass, the mechanical and electrical damping relate to the air resistance and electrical repulsion in the capacitor comb. However in order to implement our charge-constrained device we will need to tweak the values of the damping coefficients to:

$$b_e = \frac{q^2 \cdot d}{2N_g \cdot \epsilon_0 \cdot t} \cdot \left(\frac{1}{z^2}\right)$$

With the following parameters for our simulation:

- q (electrical charge of the capacitor) = 37.5 pC
- d (distance between two fingers, plates of capacitor) = 6 μm
- N_g (number of gaps, number of capacitors) = 120
- ϵ_0 (dielectric constant of free space) = $8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m
- t (comb thickness) = 60 μm

As the fingers of our capacitor move towards each other (overlap mode), the electrical damping will be a function of this distance and will increase quadratically as the plates approach due to the charge repulsion.

$$b_m = \left(\frac{N_g \cdot \mu \cdot t \cdot l}{d} + \frac{\mu \cdot A}{h} \right) \cdot z$$

With the following parameters for our simulation:

7. μ (air viscosity, variable) = $1.78 \cdot 10^{-5}$ kg/(m·s)
8. A (surface of the plate) = $2000 \times 2200 \times 10^{-12}$ μm^2
9. l (finger length) = 650 μm
10. h (device layer/substrate distance) = 2 μm

The mechanical damping is separated into two coefficients, one for lateral and one for vertical movement. We will now use these modified, adapted parameters in the equation which now has the following form:

$$m \cdot z'' + b_e + b_z + kz = -my''$$

This equation is hard to resolve analytically, the simulation of it's behavior is being done using MathCAD using the parameters mentioned above. The excitation y is a sinusoidal wave with the frequency corresponding to the resonant frequency of the structure [Fig. 4].

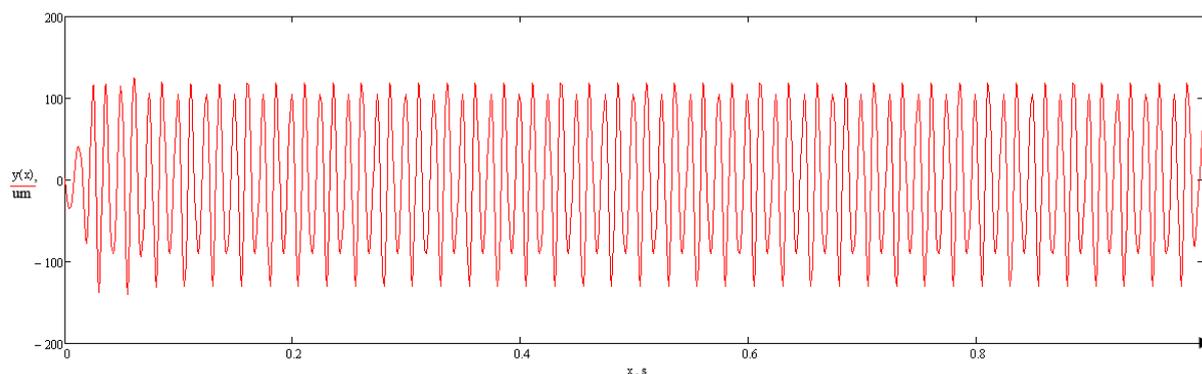


Figure 4. Excitation at resonant frequency (112 Hz)

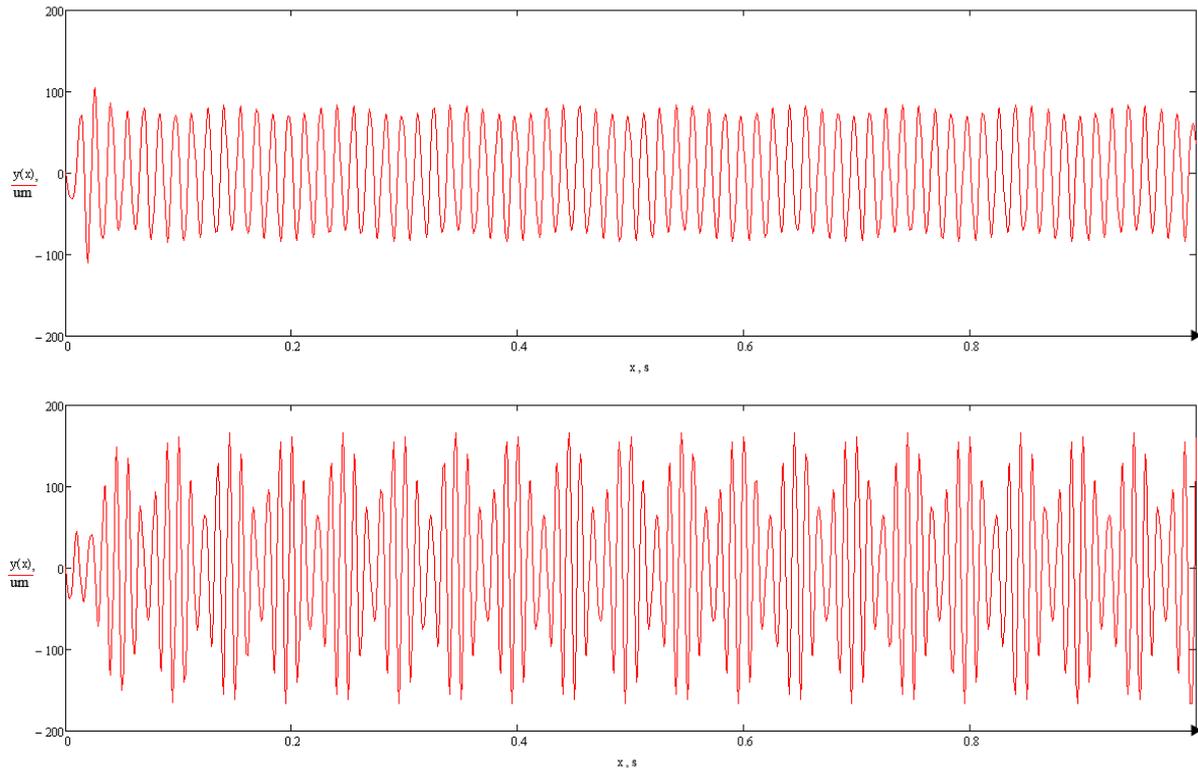


Figure 5. Excitation at non-resonant frequency (120 Hz at the top, 100Hz at the bottom)

From the Fig.5 it can be noticed, that amplitude of excitation is much lower than at the resonance frequency.

Theoretical examination of the electrical circuit

The transfer of the electrical energy gain is made by using the LC resonating circuit [Fig. 6]. We will analyze a half of the energy transfer cycle which includes the action of two MOS switches and a displacement of the capacitor at 112 Hz resonating frequency, resulting in a switch of overall capacity. To power the system, for the initial charge of the capacitor the power supply of 5 V is used. Let's begin with a summary of the cycle, and detailing afterwards the key points of the system.

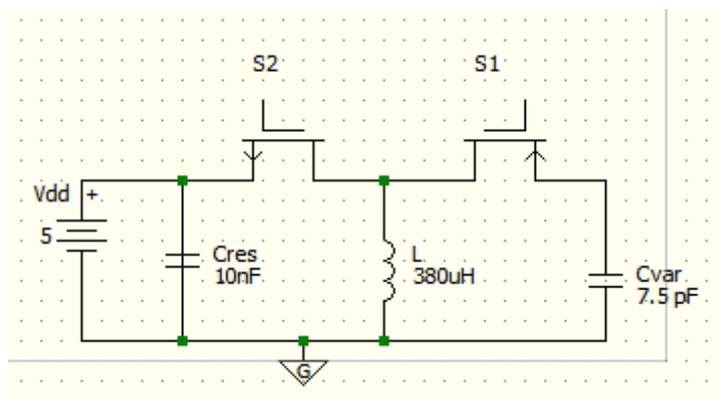


Figure 6. Electrical representation of the harvester

a) Beginning of the cycle:

$$V \text{ on } Cvar = 0;$$

$$V_{tot} = V_{dd} = 5 \text{ V};$$

b) Induction Current

$$\text{Mechanical movement: } Cvar \rightarrow Cmax = 7.5 \text{ pF};$$

- Switch S2 - on; Switch S1 - off; increase of current in inductance I_i ;
- c) Initial Capacity charge
 - Switch S2 - off; Switch S1 - on; C_{var} is charged from L ;
- d) Voltage increase on C_{var}
 - Mechanical movement: $C_{var} \rightarrow C_{min} = 3.8 \text{ pF}$;
 - Switches S2 and S1 are OFF;
- e) Induction Current
 - Switch S1 - ON; Switch S2 - OFF; increase of current in inductance I_i ;
- f) Discharge in reservoir
 - Switch S1- OFF; Switch S2- ON; energy transferred into C_{res} ;

We will now discuss in detail each step for the ideal case.

In steps b) and c) we pre-charge the capacity. The charge transfer effectuates through the inductance L and uses a resonating LC circuit parameters [Fig. 7]. In step b) we have a linear increase in current in the inductance as the voltage is held constant at 5V.

$$L \frac{di}{dt} = V \Leftrightarrow i t = \frac{V t}{L}, V = c t \epsilon$$

Adjusting the system parameters to obtain 5V on the capacitor for maximum charge.

$$E = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} C_{var} V^2 \Leftrightarrow V = \sqrt{\frac{L I^2}{C_{var}}} = 5V$$

As the maximum current will be transferred we will need to calculate the time constant of the circuit taking the previous expression for I , obtaining: $t = \sqrt{L C_{var}}$

which is the time constant for the LC circuit. Therefore to obtain 5V ($=V_i$) on the capacitor we need to have the current: $I = V \sqrt{C/L}$

with the time for step b): $t_b = \sqrt{L C_{var}}$

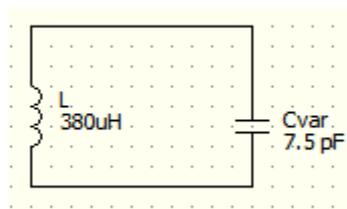


Figure 7. LC-circuit

For the step c) we must consider the LC circuit which acts like a loss-less resonator and therefore is subject to the relation:

$$L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_{var}} \int i \cdot dt = 0 \Leftrightarrow \frac{di^2}{dt^2} + \frac{1}{L C_{var}} i = 0$$

The solution to the system is a superposition of sinusoidal functions, during the charge the initial condition tells us that the current is at it's maximum in the inductor therefore we have:

$$i = A \cos(\omega t), \omega = \frac{1}{t} = \frac{1}{\sqrt{L C_{var,max}}}$$

$$A = V_i \sqrt{C_{var,max}/L}$$

The voltage across the capacitor is at it's maximum at one fourth of the cycle when $i = 0$, therefore the time for step c) is:

$$t_c = 0.25 \sqrt{LC_{var,max}}$$

The total charge transferred to the capacity is:

$$Q = C_{var,max} \cdot V \cdot i = 5V \cdot 7.5pF = 37.5pC$$

During the step d) the capacity $Cvar$ decreases following the vibration of the comb, related directly to the vibration of the mass. The resonating frequency is 112 Hz, which means that the period during which the capacity changes is 8.9 ms. For the purposes of comparison, the MOSFET switch time delay is 900 ns - 1500 ns, for $L = 380 \mu H$, $t_c = 53$ ns, therefore we consider that during the electrical energy harvesting the capacity is constant at it's maximum and minimum. As both MOSFET switches are off during the transition, the $Cvar$ is cut off from any circuit which leads to a conservation of charge.

Step e) occurs when the capacity is at it's minimum $Cvar,min = 3.8 pF$. Voltage gain is:

$$V_f = \frac{Q}{C_{var}} = \frac{37.5pC}{3.8pF} = 9.87V$$

The transfer of energy goes through the same LC circuit as we used in step c), however the time constant changes due to the capacity change as well as the solution of the differential equation. As at the beginning of the cycle all the charge is in the capacity, the current at t_0 is non-existent. The solution is a sinusoid:

$$i = A \sin(\omega t), \omega = \frac{1}{\sqrt{LC_{var,min}}}$$

$$A = V_f \sqrt{\frac{C_{var,min}}{L}}$$

We use the new values for voltage and capacity in this solution. The transfer of energy into the inductor occurs at a quarter of the cycle when the current is at its peak, therefore the change in time is only due to the change in capacity.

The last step is the linear transfer of energy from L into reservoir capacity $Cres$. We will now calculate the amount of energy gained during this half-cycle in a perfect system (no losses).

Initial energy in the capacitor:

$$E_i = \frac{1}{2} C_{res,max} V_i^2 = \frac{1}{2} \cdot 7.5 \cdot 10^{-12} \cdot 5^2 = 93.75pJ$$

After the gain we obtain:

$$E_f = \frac{1}{2} C_{res,min} V_f^2 = \frac{1}{2} \cdot 3.8 \cdot 10^{-12} \cdot 97.41 = 185pJ$$

Therefore the energy gain is:

$$\Delta E = 0.091nJ$$

NB1. In case of standard formula from the charge constrained capacitor cycle we obtain again:

$$E = \frac{1}{2} (C_{res,max} - C_{res,min}) V_i \cdot V_f = \frac{1}{2} \cdot 3.7 \cdot 10^{-12} F \cdot 5V \cdot 9.87V = 0.091nJ$$

The result is the same as expected.

NB2. The voltage limit across the circuit is of 30V which is the maximum voltage supported by MOSFET components. We could therefore improve the energy harvesting by introducing the initial value of 15V into our system, therefore obtaining $V_i = 15V$ and $V_f = 29.6V$. By doing so we increase energy harvesting to:

$$E = \frac{1}{2} \cdot 3.7 \cdot 10^{-12} F \cdot 15V \cdot 29.6V = 0.821nJ$$

However this requires a constant source of voltage which is very high for IC. There are also additional calculations to be performed concerning energy losses and dissipation, as well as current strength for such a circuit.

The presented energy gain is only for the half of the cycle as the two combs work at the same time in opposite directions. The calculations of the second half mirror the ones done for the first half of the cycle. Therefore we calculate that in 1 full cycle at the frequency of 115 Hz we obtain 0.182 nJ of energy. The power output of such system would be then:

$$P = \frac{0.182nJ}{cycle} \cdot \frac{115cycle}{s} = 20.93nW$$

The second half of the electric circuit is a simple addition over the existing one.

Simulation Behaviour model

Simulation was made in Coventorware software. Design process is divided into several parts. At first it's necessary to create behavior model of a harvester from a unique and comprehensive library of MEMS building blocks, and simulate its behavior together with surrounding electronics within a schematic-based system-level modeling environment. One can find such a model (without electronic part) on the Fig. 8.

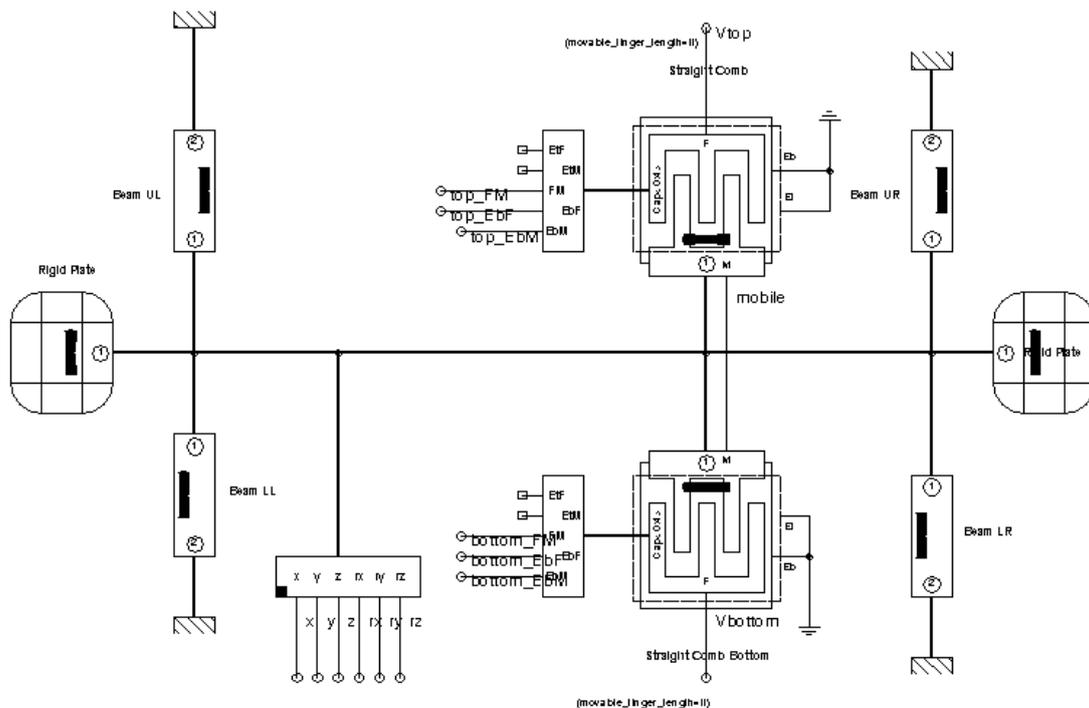


Figure 8. The sketch of energy harvester in Coventorware software

Each element has lot of parameters, that allows you to create your own unique device using the standard libraries of building blocks. The main properties of the system without binding to any

specific element is presented in the table 2. These values were used in the electrical circuit and mechanical part analysis.

Following the mechanical schematic we use four beams acting as oscillating springs, with the mass attached to them. The oscillations of the body move the Straight Combs which contribute to electrical damping on the mechanical study and act as capacitors in the electric circuit.

Table 2. Design parameters of the harvester

Design parameter	Value
Length of spring	1000 μm
Width of spring	4 μm
Total number of fingers	238
Finger length	650 μm
Finger width	13 μm
Gap between movable and straight fingers	6 μm
Size of suspended mass	2000x2200 μm^2

The 3D-model [Fig. 9] of the harvester was created using Architect Scene3D module.

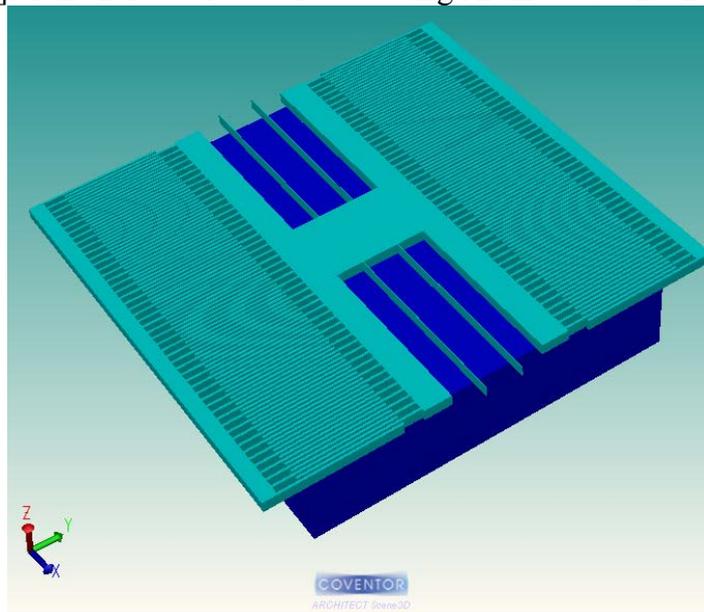


Figure 9. 3D-model of the energy harvester

There is no any information about straight comb's support on the picture. It's hidden due to simplify the visualisation process.

Small-signal analysis

In order to find resonant frequency of the movable part (mass plus fingers) at y-direction (Fig. 9) the small-signal simulation was made. The results are presented on Fig. 10.

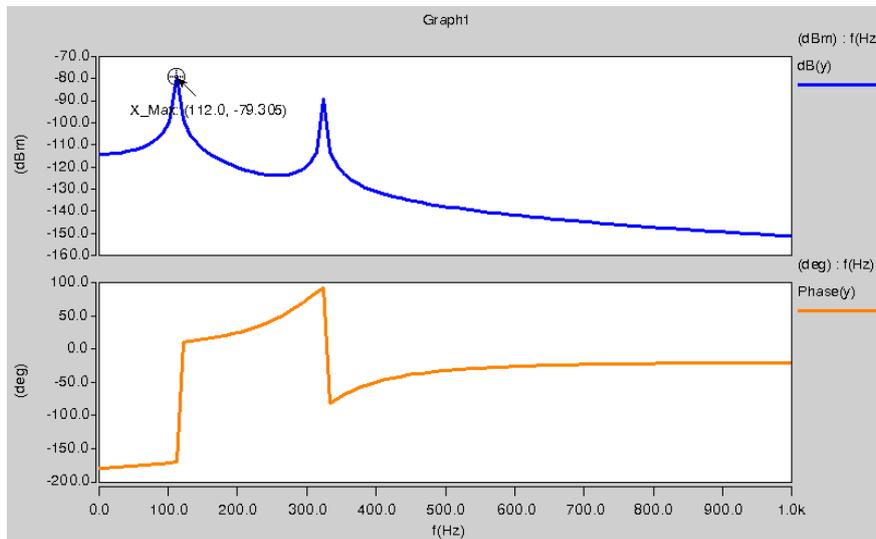


Figure 10. Scan for the resonance frequency of the movable part

There are two maximums at the amplitude-frequency graph. The first one is at 112Hz, and the second one at 303Hz. The difference in amplitude is about 10dB (the amplitude of the displacement is 10 times less), so we can perform deeper analysis just on the first resonance frequency. The results of AC-analysis were linked with Architect Scene3D module that allows visualisation of displacement (Fig. 11).

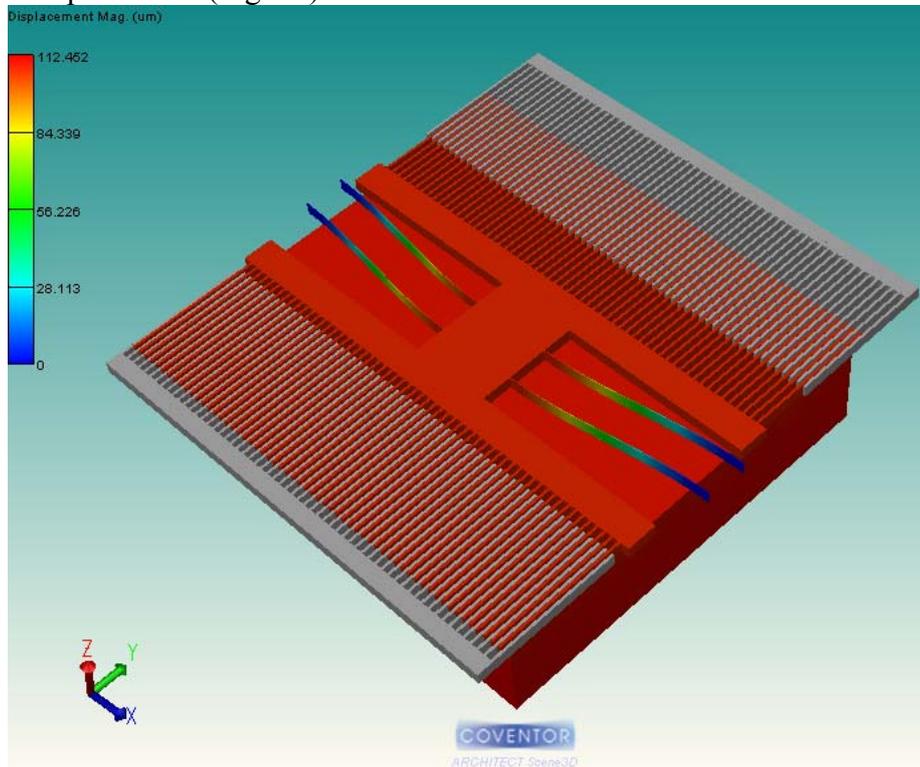


Figure 11. 3D-picture of mass displacement in resonance regime

It could be noticed that the amplitude of displacement is 112.5 μ m. This information was used in previous part to calculate the total power that can be produced with such a device.

Technology

The developed energy harvester [Fig. 12] is based on Tronic's SOI-HARM technology. It's proposed on a Multi-Project Wafer (MPW) service. By gathering the designs of multiple customers on the same masks set, MPWs allow to fabricate test structures and prototypes of devices at a very low cost.

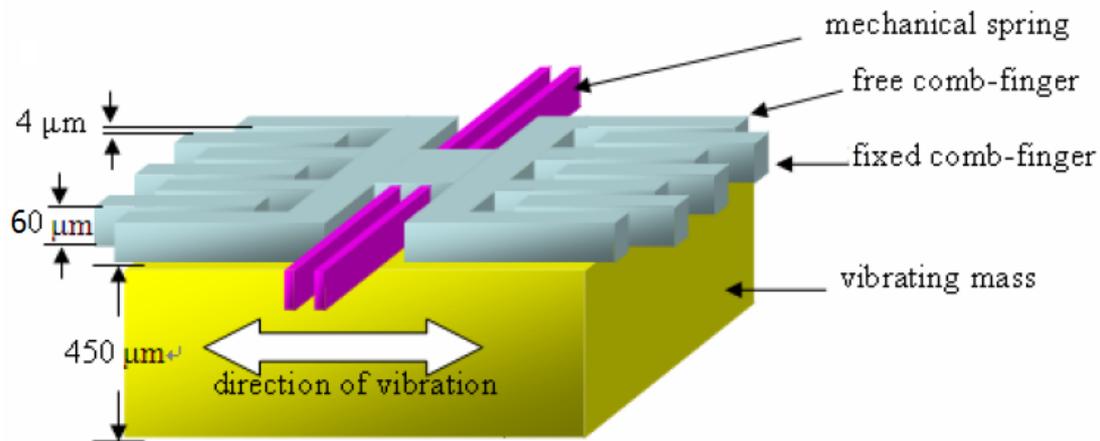


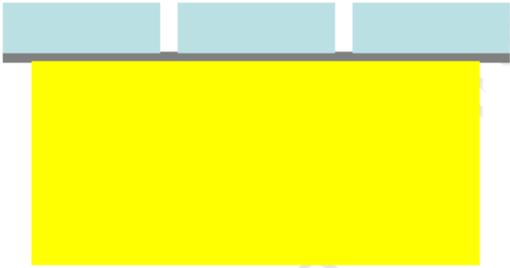
Figure 12. Electrostatic comb-drive energy harvester

Due to such approach there is a list of strict design rules [5]. Besides common rules, like minimum line widths and spaces, there is, e.g., information about relation between the dimensions of a suspended mass and the dimensions of its suspension beams. All these rules have to be taken into account while developing the layout of the harvester.

At the beginning there is a SOI wafer, p-type doped, 10-20 mOhm·cm, 60 μm/2μm/450 μm. The main process flow for the harvester is presented in the table 3.

Table 3. Process flow presentation

Cross section	Description
	Metalization: Deposit and etching of a metallic layer (it will not be shown on the next steps).
	SOI patterning: Silicon deep dry front-side etching. Etch stop layer : SiO ₂ SOI.

	<p>Suspended mass patterning: back-side etching.</p> <p>Due to technological restrictions, this step should be performed <i>outside</i> of Tronic’s fab.</p>
	<p>The realising of mass, springs and comb fingers: Sacrificial layer HF etching; Rinsing and drying.</p>

Two main technological steps are DRIE (with SiO₂ from SOI etch stop) and sacrificial layer HF etching, that is necessary to release movable part of comb drive.

Tronic’s SOI-HARM technology is supported by a design kit on Coventorware the design tool platform of Coventor. The design kit includes both the process flow and the material database of the technology in order to facilitate design and simulations. That’s why, during the harvester modelling in Coventor, it was possible to control the ability of fabrication of the device.

Conclusion

A vibration energy harvester of in-plane, gap overlap, electrostatic comb-drive operating in charge-constrained cycle is developed in this work. The harvester of size 3000 μm × 3000 μm × 500 μm is the smallest vibration harvester capable of resonating at 112 Hz and applicable to System-on-Chip design. The gap between the comb-fingers is 6 μm as it is very close to the minimum line-width of DRIE process. Four mechanical springs are designed to support the mass and they are placed symmetrically to prevent the vibrating mass from wobbling during energy harvesting. Each spring component is 1000 μm long, 4 μm wide, and 60 μm high to provide in-plane stiffness and out-of-plane stiffness of two-order higher to ensure the desired motion. The 2000 μm × 2200 μm × 450 μm vibrating mass is made of the handle layer to enable the harvester resonating at 112 Hz. The average output power of 20.93 nW.

References

1. S. Roundy, P. K. Wright, J. Rabaey, “A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes”, *Elsevier, Computer Communications*, 26, pp.1131–1144, 2003.
2. S. Meninger, J. Mur-Miranda, R. Amirtharajah, A. P. Chandrasakan, and J. H. Lang, “Vibration-to-electric energy conversion”, *IEEE Trans. on VLSI* 9, February 2001.
3. L. Mateu and F. Moll, “Review of Energy Harvesting Techniques and Applications for Microelectronics”, *Proceedings of the SPIE Microtechnologies for the New Millenium*, 2005.
4. G.-J. Sheu, S.-M. Yang, T. Lee, “Development of a Low Frequency Electrostatic Comb-Drive Energy Harvester Compatible to SoC Design by CMOS Process”, *Sensors and Actuators: A Physical*, doi:10.1016/j.sna.2010.07.013, 2010.
5. J. Collet, “60μm SOI High Aspect Ratio Micromachining. Design Rules Manual”, *The microBUILDER Design Handbook, module IV*, September 2006.
6. S. Roundy, P. Kenneth Wright, J. M. Rabaey, “Energy scavenging for wireless sensor networks: with special focus on vibrations”.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЗАРЯДОВОГО СОСТОЯНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЁНОК МДП-СТРУКТУР В РЕЖИМЕ СТУПЕНЧАТО ВОЗРАСТАЮЩЕГО ИНЖЕКЦИОННОГО ТОКА

Андреев Д.В.

Научный руководитель: профессор Столяров А.А.

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

RESEARCH OF CHANGE OF CHARGING STATE NANOSIZE DIELECTRIC FILMS IN MOS-STRUCTURES UNDER STEPS INCREASING INJECTION CURRENT

Andreev D.V.

Scientific adviser: Stolyarov A.A.

Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch), Kaluga, Russia

Аннотация

Данная работа посвящена исследованию изменения зарядового состояния наноразмерных диэлектрических плёнок МДП-структур в сильных электрических полях при ступенчатом возрастании инжекционного тока. Предложена модель изменения зарядового состояния МДП-структур в сильных электрических полях. Показано, что на изменение зарядового состояния наноразмерных диэлектрических плёнок МДП-структур в режиме ступенчато возрастающего инжекционного тока существенное влияние оказывают режимы инжекции заряда и технологические особенности формирования диэлектрических плёнок.

Abstract

This work is described research of change of a charging state nanosize dielectric films of MOS-structures in strong electric fields at step increase of an injection current. The model of change of a charging state of MOS-structures in strong electric fields is offered. It is shown that on change of a charging state nanosize dielectric films of MOS-structures in a mode of in steps increasing injection current essential influence is rendered by modes of injection of a charge and technological features of formation of dielectric films.

В настоящее время для исследования характеристик интегральных микросхем и полупроводниковых приборов со структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) широко используется метод исследования, основанный на создании в МДП-структуре режима сильнополевой инжекции заряда в диэлектрик при ступенчатом возрастании инжекционного тока [1,2]. Основным информационным параметром в этом методе является статистическое измерение величины заряда, инжектированного до пробоя образца [1,2]. Однако режимы инжекции заряда и технологические особенности формирования диэлектрических пленок могут оказывать существенное влияние на результаты измерений. Следовательно, исследование изменения зарядового состояния наноразмерных диэлектрических плёнок МДП-структур в режиме ступенчато возрастающего инжекционного тока имеет большое значение для правильной интерпретации результатов измерения.

В данной работе на основе предложенной модели проведено исследование изменения зарядового состояния наноразмерных диэлектрических плёнок МДП-структур $\text{Si-SiO}_2\text{-Si}^*$ в сильных электрических полях при ступенчатом возрастании инжекционного тока.

В результате токового воздействия МДП-структура переходит в режим сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик. Помимо захвата электронов на исходные ловушки в диэлектрической плёнке двуокиси кремния происходит генерация новых электронных ловушек с коэффициентом генерации g . Захват дырок в диэлектрике хорошо описывается благодаря модели межзонной ударной ионизации, которая была предложена ранее [3].

Для описания процессов, происходящих в диэлектрической плёнке, были использована система уравнений [3,4] с некоторыми уточнениями:

- уравнение сдвига напряжения на МДП-структуре при инжекции электронов из кремния в режиме протекания постоянного инжекционного тока

$$\Delta V_I(+)=\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0}\left[n_t(d_{ox}-x_n)-p(d_{ox}-x_p)\right], \quad (1)$$

- уравнение для плотности положительного заряда, накапливаемого в пленке SiO₂

$$q\frac{dp}{dt}=J_n\cdot(m-1)\cdot\sigma_p\cdot(N_p-p)-J_n\cdot\sigma_n\cdot p, \quad (2)$$

- уравнение для плотности тока Фаулера-Нордгейма

$$J_n=AE^2\exp\left(-\frac{B}{E}\right), \quad (3)$$

- уравнение для плотности электронов, накапливаемых в объеме SiO₂

$$n_{t0}=N_{t0}\cdot\left[1-\exp\left(-\frac{\sigma_{t0}}{q}Q_{inj}\right)\right], \quad (4)$$

- уравнение для плотности электронов, захваченных на сгенерированные при сильнополевом воздействии ловушки

$$n_t=\frac{g}{q}\cdot Q_{inj}-\frac{g}{\sigma_g}\left[1-\exp\left(-\frac{\sigma_g\cdot Q_{inj}}{q}\right)\right], \quad (5)$$

- уравнение нейтральности заряда

$$Q_0=Q_c+Q_{inj}, \quad (6)$$

- уравнение, описывающее заряд, который инжектирован в диэлектрик до его пробоя

$$Q_{BD}=\sum_{i=1}^n J_i\cdot t_i, \quad (7)$$

где q – заряд электрона; $\varepsilon\varepsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика; n_{t0} – плотность электронов, накапливаемых в SiO₂; n_t – плотность электронов, захваченных на сгенерированные ловушки; p – плотность дырок, накапливаемых в SiO₂; d_{ox} – толщина подзатворного диэлектрика; x_n и x_p – положения центроидов (относительно границы Si-SiO₂) отрицательного заряда в SiO₂ и положительного заряда в SiO₂ соответственно; N_{t0} и σ_{t0} – плотность и сечение захвата электронных ловушек в пленке SiO₂; t – время; Q_{inj} – заряд, инжектированный в диэлектрик; $(m-1)$ – коэффициент генерации дырок (m – коэффициент умножения электронов); g – коэффициент генерации электронных ловушек; σ_g – сечение захвата сгенерированных электронных ловушек; N_p и σ_p – плотность и сечение захвата дырочных ловушек в SiO₂; σ_n – сечение захвата инжектированных электронов заполненными дырочными ловушками; $A=1,54\cdot 10^{-6}\cdot m_0/m^*\cdot\varphi_B^{-1}$ [A/B²] и $B=6,83\cdot 10^7\cdot m_0/m^*\cdot\varphi_B^{3/2}$ [В/см] – постоянные туннельной по Фаулеру-Нордгейму инжекции; m_0 и m^* – масса электрона в вакууме и эффективная масса электрона в диэлектрике; φ_B – высота потенциального барьера на инжектирующей границе раздела; E – напряжённость катодного электрического поля; Q_{BD} – заряд, инжектированный в диэлектрик до пробоя; J_i – плотность инжекционного тока на i -ом участке времени; t_i – i -ый промежуток времени. Система (1-7) решалась при начальных условиях: $n_{t0}(0)=n_t(0)=p(0)=0$.

Параметры модели, входящие в выражения (1-7), при моделировании изменения зарядового состояния МДП-структуры Si-SiO₂-Si* полагались равными: $b_0=3\cdot 10^{-13}$ МВ³/см; $\sigma_g=4\cdot 10^{-20}$ см²; $N_{t0}=1,3\cdot 10^{12}$ см⁻²; $g=3,5\cdot 10^{-6}$; $\sigma_{t0}=5,3\cdot 10^{-18}$ см²; $N_p=1,5\cdot 10^{12}$ см⁻²; $\sigma_p=8\cdot 10^{-13}$ см².

Как видно из приведённой системы уравнений, уточнение было произведено путём учёта генерации новых электронных ловушек, введением уравнения нейтральности заряда, а для

подсчёта заряда, инжектированного в диэлектрическую плёнку за время измерения, было предложено уравнение (7).

При моделировании было принято, что генерация электронных ловушек равномерна по всему объёму окисла.

Уравнение для плотности захваченного положительного заряда (3) учитывает рекомбинацию захваченных дырок с электронами.

Установлено, что при реализации режима, ступенчато возрастающей токовой нагрузки необходимо учитывать процесс заряда емкости МДП-структуры [5]. Длительность ступеньки необходимо выбирать исходя из обеспечения стационарного режима инжекции. Выявлено, что технологические режимы формирования диэлектрических пленок МДП-структур могут во многом определять изменение их зарядового состояния в режиме сильнополевой инжекции электронов в подзатворный диэлектрик при ступенчатом возрастании токовой нагрузки и, следовательно, оказывать существенное влияние на заряд, инжектированный до пробоя.

Таким образом, на основе результатов моделирования и сопоставления их с экспериментальными данными показано, что на изменение зарядового состояния наноразмерных диэлектрических плёнок МДП-структур в режиме ступенчато возрастающего инжекционного тока существенное влияние оказывают режимы инжекции заряда и технологические особенности формирования диэлектрических пленок.

Литература

1. Масловский В.М., Личманов Ю.О., Семанович Е.В. Влияние протяженных дефектов на пробой тонкопленочных МДП-структур // Письма в ЖТФ. - 1993. - Т. 19. - Вып. 24. - С. 11-16.

2. JEDEC Solid State technology Association. Procedure for the Wafer-Level Testing of Thin Dielectrics. April, 2001.

3. Arnold D., Cartier E., DiMaria D.J. Theory of high-field electron transport and impact ionization in silicon dioxide // Phys. Rev. B. 1994. Vol.49. № 15. P.10278-10297.

4. Bondarenko G.G., Andreev V.V., Drach V.E., Loskutov S.A., Stolyarov M.A. Study of temperature dependence of positive charge generation in thin dielectric film of MOS structure under high-fields // Thin solid films. 2006 V.515. 670-673.

5. Андреев В.В., Столяров А.А., Васютин Д.С., Михальков А.М. Контроль качества диэлектрических слоев интегральных микросхем и изделий микросистемной техники // Научно-технические технологии. 2010. Т.11. № 7. С.44-52.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы гк №П470 и №16.740.11.0151.

УСТРОЙСТВО СОЗДАНИЯ ИНЖЕКЦИОННЫХ РЕЖИМОВ В МДП-ПРИБОРАХ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПЛЁНКАМИ

Дмитриев В.Г., Романов А.В.

Научный руководитель: д.т.н., профессор Андреев В.В.

Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Калуга, Россия

THE DEVICE OF CREATION OF INJECTION MODES IN MOS-DEVICES WITH NANOSIZE DIELECTRIC FILMS

Dmitriyev V.G., Romanov A.V.

Scientific adviser: Andreev V.V.

Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch), Kaluga, Russia

Аннотация

Описано устройство для контроля параметров МДП-приборов, использующее метод управляемой токовой нагрузки. Устройство может работать в следующих режимах: контроль дефектности изоляции и дефектности зарядовой стабильности; контроль изменения зарядового состояния МДП-структур; инжекционной модификации диэлектрических плёнок МДП-приборов.

Abstract

The device for test the parameters of MOS-devices using the method of controlled current stress is described. The device can operate in the following modes: control of defect isolation and control of defect the charge stability; control changes the charge state of the MOS-structures; injection modification of the dielectric films of the MOS-devices.

В настоящее время все более возрастает интерес к структурам металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) в связи с бурным развитием микро- и нанoeлектроники. Это обусловлено необходимостью снижения энергии потребления и массогабаритных характеристик, увеличения производительности радиоэлектронной аппаратуры.

Для исследования изменения зарядового состояния и дефектности МДП-приборов при различных критических воздействиях широко применяются методы вольт-фарадных характеристик, сильнополевой инжекции заряда в диэлектрик и др. [1-3] Ранее был предложен инжекционный метод управляемой токовой нагрузки, позволяющий определять параметры заряда диэлектрика, которые традиционно определялись с использованием квазистатических и высокочастотных вольт-фарадных характеристик [4-5]. На базе метода управляемой токовой нагрузки был разработан единый подход к изучению дефектов изоляции и зарядовой стабильности МДП-приборов при критических воздействиях [6]. Метод управляемой токовой нагрузки основан на анализе временной зависимости напряжения на МДП-приборе при подаче на него токовой нагрузки. Метод позволяет контролировать дефектность диэлектрических слоев по измерениям напряжения микропробоя на участке сильнополевой туннельной инжекции. Реализация измерения напряжения микропробоя в рамках метода инжекции заряда в диэлектрик импульсом постоянного тока расширяет информативность данного метода в области низких и высоких электрических полей.

Для реализации метода управляемой токовой нагрузки для контроля параметров диэлектрических слоев МДП-приборов при стрессовых воздействиях было разработано устройство создания инжекционных режимов в МДП-приборах с наноразмерными диэлектрическими плёнками. Устройство работает под управлением персонального компьютера.

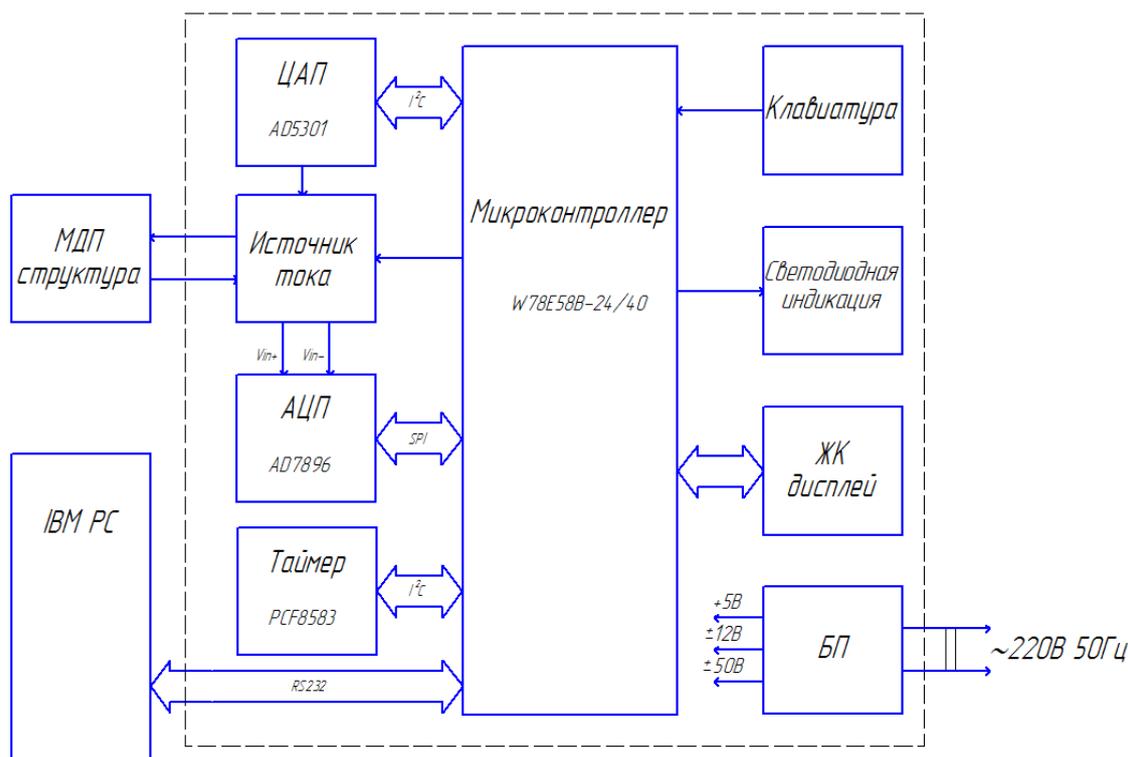


Рисунок 1 - Структурная схема устройства создания инъекционных режимов в МДП-приборах с наноразмерными диэлектрическими плёнками

Основу устройства составляет микроконтроллер W78E58B-24/40. Он осуществляет общее управление устройством, индикацию режимов работы, связь устройства с ПК.

Управляемый высоковольтный источник тока служит для формирования токовой нагрузки, прикладываемой к МДП-прибору. Он выполнен на операционном усилителе ОРА454 по схеме с нагрузкой в цепи обратной связи и токозадающим резистором на инвертирующем входе. Коммутацию токозадающих резисторов в диапазоне $10^9 \div 10^5$ Ом обеспечивают герконовые реле с малыми токами утечки. Печатная плата источника тока помещена в металлический экран.

Цифро-аналоговый преобразователь, выполненный на микросхеме AD5301, служит для плавной регулировки токового воздействия, подаваемого на МДП-прибор.

Аналогово-цифровой преобразователь AD7896 производит измерение напряжения на МДП-приборе при подаче на него токового воздействия.

С помощью таймера PCF8583 производится отсчёт времени проведения инъекции.

Устройство имеет следующие основные технические характеристики:

Амплитуда инъекционных токовых нагрузок, А 10^{-9} - 10^{-5} ;

Указанный токовый диапазон разбит на 5 поддиапазонов, внутри которых возможна плавная регулировка амплитуды тока.

Разрядность АЦП, бит 12;

Время измерения напряжения, мкс 8;

Разрядность ЦАП, бит 8;

Максимальное напряжение, подаваемое на структуру, В ± 50 ;

Максимальная емкость измеряемых МДП-структур, пФ 5000;

Управление данным устройством и сбор экспериментальных данных осуществляется с помощью ПК. Управляющая программа написана в среде LabVIEW. Программа позволяет производить чтение данных с записью их в файл на жестком диске ПК, задавать различные виды воздействий на контролируемые объекты, производить изменение частоты измерения, а также производить изменение типа управляющего воздействия на контролируемый МДП-прибор непосредственно в процессе измерения. Это даёт возможность достичь большей гибкости при проведении измерений, а также позволяет реализовывать достаточно сложные

алгоритмы измерений. Сохранённые в виде текстового файла данные можно использовать впоследствии для дальнейшей обработки результатов измерений.

Устройство может работать в следующих режимах: контроль дефектности изоляции и дефектности зарядовой стабильности; контроль зарядовой деградации в условиях инжекции носителей, режиме инжекционной модификации диэлектрической плёнки.

В режиме контроля зарядовой стабильности и дефектности изоляции измеряются напряжение микропробоя МДП-прибора и заряд, инжектированный до пробоя.

В режиме контроля зарядовой деградации МДП-структур в условиях инжекции измеряется зависимость напряжения на МДП-структуре от инжектированного заряда и определяется изменение напряжения на МДП-структуре при определенной величине инжектированного заряда.

Применение инжекционного метода и данного устройства в операционном контроле технологического процесса получения инжекционнотойкого подзатворного диэлектрика позволяет наряду с контролем качества проведения технологических операций прогнозировать выход годных интегральных схем, оптимизировать технологические режимы при отработке новых конструкторско-технологических вариантов ИС, оперативно управлять технологическим процессом.

Литература

1. Fischetti M. Generation of positive charge in silicon dioxide during avalanche and tunnel electron injection // J. Appl. Phys. – 1985. – Vol. 57. – No 8. – P. 2863-2879.

2. Барабан А.П., Булавинов В.В., Коноров П.П. Электроника слоев SiO₂ на кремнии.- Л.: ЛГУ, 1988.-304 с

3. Lombardo S., Stathis J.H., Linder P., Pey K.L., Palumbo F., Tung C.H. Dielectric breakdown mechanisms in gate oxides // J. Appl. Phys. 2005. Vol.98. P.121301.

4. Андреев В.В., Барышев В.Г., Столяров А.А. Инжекционные методы исследования и контроля структур металл-диэлектрик-полупроводник: Монография.// М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 256 с.

5. Андреев В.В. Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А. Метод многоуровневой токовой нагрузки для исследования генерации и релаксации положительного заряда в МДП-структурах// Микроэлектроника. 2003. Т.32. № 2. С.152-158.

6. Андреев В.В., Столяров А.А., Васютин Д.С., Михальков А.М. Контроль качества диэлектрических слоев интегральных микросхем и изделий микросистемной техники // Научно-технические технологии. 2010. Т.11. № 7. С.44-52.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы ГК №П470 и №16.740.11.0151.

ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ БОРТОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ «СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ»

Панкин А.В.

Научный руководитель: Шпиев В.А.
ФГУП «НИИ «Аргон», Москва, Россия

Аннотация

В работе рассмотрены принципы проектирования бортовых вычислительных систем.

Введение

Рынок бортовых вычислительных комплексов предъявляет все новые требования к электронным продуктам, как по функциональным, так и по параметрам надежности и компактности. Сегодня для успеха в данном сегменте рынка, устройства должны быть спроектированы с учетом следующих требований:

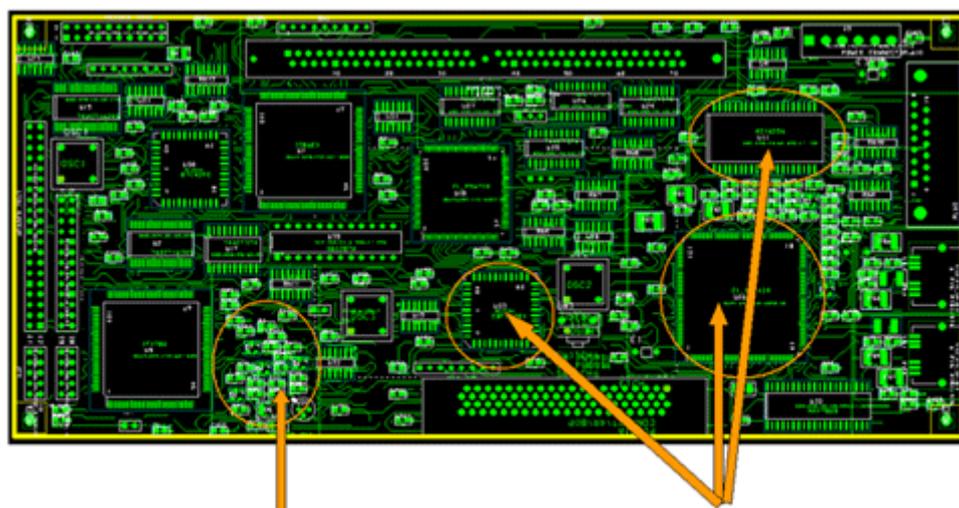
- уникальный набор функций, отличный от конкурентов;
- развитый пользовательский интерфейс;
- высокая производительность устройства;
- низкое энергопотребление;
- большое количество современных проводных и беспроводных интерфейсов;
- минимальные массогабаритные показатели устройства;
- длительный срок эксплуатации;
- устойчивость к широкому спектру воздействий;
- меньшая цена конечного устройства.

Реализовать эти требования в одном электронном устройстве можно с помощью применения технологии СнК.

Термин «система на кристалле» приобрел большую популярность. Изделия этого класса часто анонсируются и воспринимаются как новое направление в развитии электронной техники, призванное вытеснить «классические» СБИС.

Сегодня для построения бортовых систем управления и сбора данных наиболее эффективна концепция “системы на кристалле”, внедрение которой является одним из приоритетных направлений развития отечественной электроники.

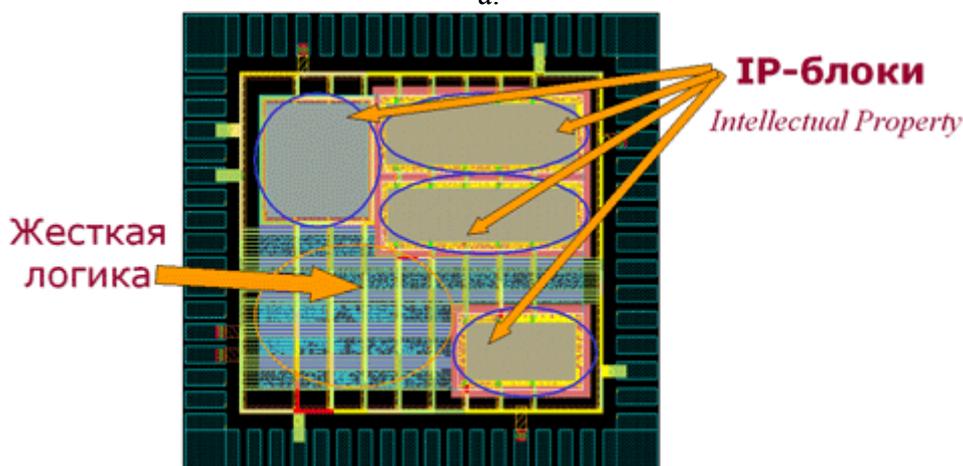
Система на кристалле — это СБИС, интегрирующая на кристалле различные функциональные блоки, объединенные внутрикристалльным интерфейсом и которые образуют законченное изделие для автономного применения в электронной аппаратуре. Повышение степени интеграции дало возможность заменить одним кристаллом целую микропроцессорную плату с группой различных электронных компонент (рис. 1).



Дискретные
элементы

Электронные
компоненты

а.



Жесткая
логика

IP-блоки

Intellectual Property

б.

Рисунок 1 - а – система на печатной плате, б – система на кристалле

Классическая “система на печатной плате” собирается из готовых электронных компонент: специализированных СБИС (ASIC), полужаказных ИС (ПЛИС, БМК), ИС средней и малой степени интеграции, а также дискретных элементов (транзисторов, резисторов) и т.п.

В “Системе на кристалле” кроме жесткой логики традиционной для ASIC устройств в ней используются IP – блоки, которые в определенной мере можно считать аналогами готовых компонент. IP – блоки по сути математические модели (топология, список цепей, RTL - код), функционально законченных блоков и устройств.

Структура “Системы на кристалле”

В классическом понимании “система на кристалле” – это интегрированная система потоковой обработки данных, имеющая в своем составе конечный автомат управления, в качестве которого может выступать, например, микропроцессор и набор контроллеров, решающих вычислительные и интерфейсные задачи с помощью аппаратных средств.

Сложившаяся традиция возлагать на центральный процессор общего назначения задачи обработки потоков данных не всегда технически оправдана, особенно в бортовых системах, где, как правило, остро стоит проблема производительности, габаритов, энергопотребления.

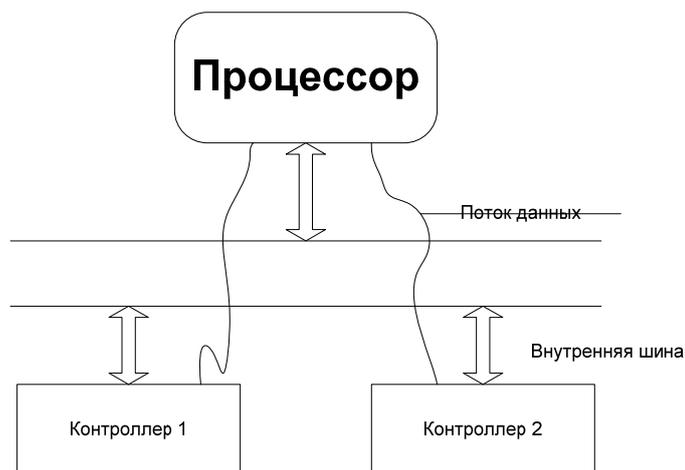


Рисунок 2 - Традиционный подход к построению электронных устройств

Принципиальные особенности подхода “системы на кристалле” заключается в:

- интеграции на одну микросхему технологической платформы (как правило, сверхвысокой степени интеграции) функционально законченного набора модулей управления и обработки данных;
- организация потока данных внутри системы непосредственно между контроллерами, а не через микропроцессорную шину;
- ориентация встроенного микропроцессора преимущественно на задачи управления.

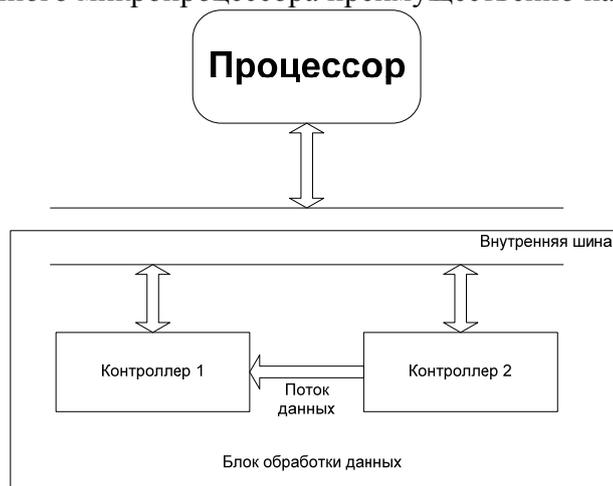


Рисунок 3 - Концепция построения аппаратуры при использовании подхода “Системы на кристалле”

Система на кристалле может включать как цифровые, так и аналоговые блоки. Основным цифровым блоком обычно является процессор, выполняющий программную обработку цифровых данных. Специализированные блоки обработки обеспечивают аппаратное выполнение функций, специфических для данной системы. Это могут быть, например, блоки цифровой обработки сигналов (DSP), аналоговые схемы, преобразователи потоков данных и др. устройства. Интерфейс с внешними устройствами обеспечивается с помощью параллельных и последовательных портов, различных шинных и коммуникационных контроллеров и других интерфейсных блоков. Обобщенная структурная схема типовой бортовой “системы на кристалле” представлена на рисунке 4.

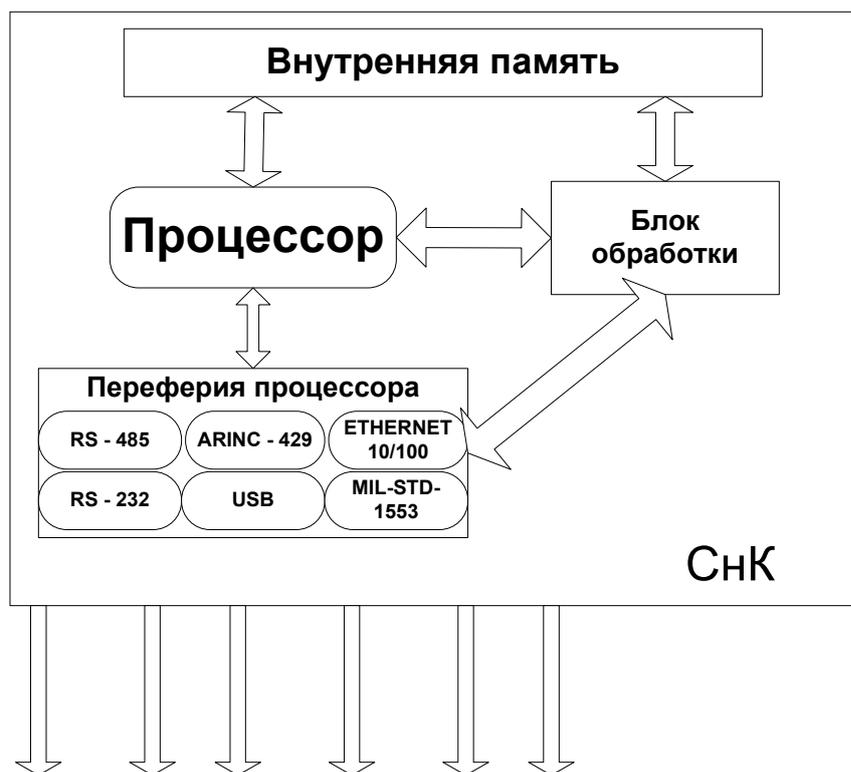


Рисунок 4 - Структурная схема типовой СнК

Состав блоков, интегрируемых в конкретной СнК, варьируется в зависимости от ее функционального назначения. Организация связей между блоками системы также может быть различной: возможно использование различных стандартизованных шин (типа AMBA) или специализированных локальных интерфейсов.

Как видно из рисунка 4, структуру СнК составляют в основном те же функциональные блоки, которые входят в состав сложно-функциональных СБИС класса микроконтроллеров и микропроцессоров. Фактически современные СнК отличаются от микроконтроллеров только наличием специализированных блоков обработки данных.

Повышение сложности проектируемых СБИС, жесткие требования к срокам их проектирования (сокращение времени выхода изделия на рынок) поставили перед разработчиками новые проблемы. В сложившихся условиях самостоятельное проектирование разработчиком СнК всех IP блоков, входящих в ее состав, не всегда целесообразно. Поэтому в последние годы широкое распространение получила практика разработки отдельных IP блоков для их последующего представления на рынок средств проектирования СнК.

В составе современных СнК используются различные типы IP блоков, в том числе и процессорные IP-блоки, реализующие архитектуру как популярных высокопроизводительных 32-разрядных процессоров (ARM, PowerPC), так и специализированных 8-разрядных процессорных ядер (PicoBlaze компании Xilinx, Nios II Eсonому компании Altera), ориентированных на формирование в FPGA.

Для реализации большого набора алгоритмов управления малой и средней сложности целесообразно использовать 8-разрядные процессоры с RISC-архитектурой, которые занимают небольшую площадь на кристалле и при достаточно высокой производительности потребляют малую мощность.

Структура разрабатываемого устройства приема и обработки данных показана на рисунке 5. В его состав входят: 8-разрядное процессорное ядро, контроллер внешней памяти программ (флэш-памяти), внутреннее ОЗУ данных объемом 4 Кбайт, авиационный интерфейс Arinc – 429, последовательный асинхронный интерфейс — RS - 485, интерфейс Ethernet и интерфейс USB, а также два 8-разрядных таймера-счетчика — Timer/Counter.

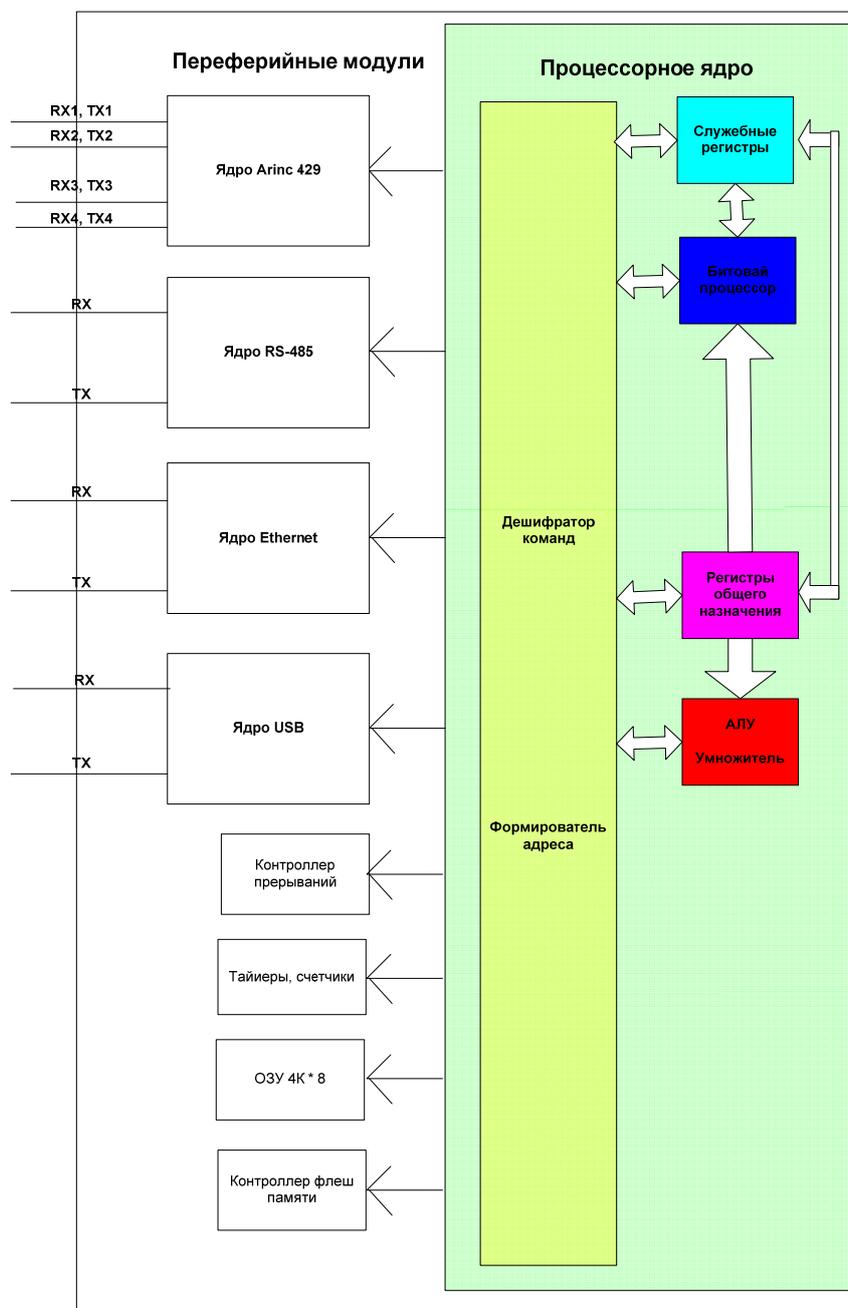


Рисунок 5 - Структурная схема разрабатываемого по технологии СпК бортового устройства

В состав разрабатываемого устройства входят следующие IP блоки:

- IP блок интерфейса Arinc – 429;
- IP блок интерфейса Ethernet;
- IP блок интерфейса RS - 485;
- IP блок интерфейса USB;

“Системы на кристалле” в бортовой вычислительной аппаратуре

Современные бортовые устройства сбора и обработки информации должны обладать следующими особенностями:

- обладать минимальными удельными массогабаритными показателями;
- сложный алгоритм функционирования;
- быть стойкой к внешним дестабилизирующим воздействиям (ускорение, удары, пониженные и повышенные температуры, радиационная стойкость) ;
- быть стойкой к действию ЭМИ;

- ресурс устройства не менее 100000 часов;
- обеспечение гибкого управления и оптимальной работы разнообразных бортовых приборов самолета;
- трансляция и преобразование сигналов, опрос оборудования;
- временное хранение данных;
- передачу данных через радиокomплекс наземным службам;

Основные функциональные блоки данного устройства будут заложены в “системе на кристалле”:

- прием, обработка и передача информации по интерфейсу Arinc-429;
- прием, обработка и передача информации по интерфейсу MIL – STD 1553;
- прием, обработка и передача информации по интерфейсу RS-485;
- прием, обработка и передача информации по интерфейсу Ethernet;
- прием, обработка и передача информации по интерфейсу USB.

Схема работы бортовой системы сбора и обработки информации представлена на рисунке 5.

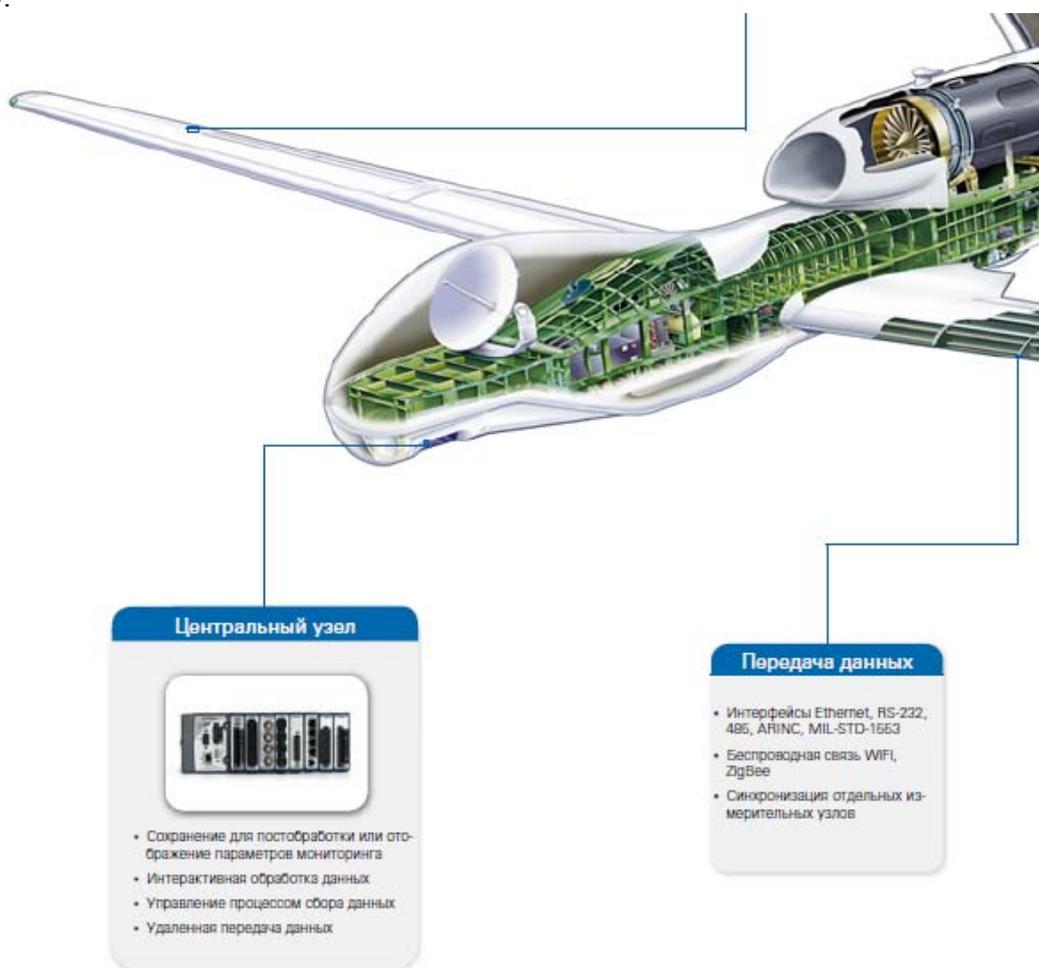


Рисунок 5 - Схема работы бортовой системы сбора и обработки информации

Датчики установленные в различных точках фюзеляжа летательного аппарата передают данные о состоянии параметров полета в центральный узел (бортовое устройство сбора и обработки информации), далее по необходимости они передаются наземным службам по радиоканалу.

Основные недостатки “систем на кристалле”.

Несмотря на явные преимущества реализации устройства по технологии СпК у нее есть следующие недостатки:

- большой срок выхода на рынок готового устройства;
- сложный процесс проектирования;
- сложный процесс тестирования и отладки;
- уход параметров микросхемы СнК при воздействии температуры;
- при выходе из строя микросхемы СнК, нарушается работа всей системы вычислительной машины;
- отсутствие научно обоснованных методик проектирования устройств по технологии СнК;
- отсутствие исследований в области стойкости устройства реализованного по технологии СнК при воздействии ЭМИ;
- отсутствие исследований устройства реализованного по технологии СнК на параметрам ЭМС.

Цель данной работы, разработать эффективные методы борьбы с данными недостатками.

Реализация проекта и основные методы исследования “системы на кристалле”.

Первый этап реализации данного проекта заключается в разработке эффективного метода проектирование на базе современных САПР, фирм Xilinx, Altera, Actel, Cadence Allegro PCB. Разработка математической модели разрабатываемого устройства с помощью САПР LAB View.

На основе уже разработанного бортового устройства связи, реализованного на системе на плате (рис. 6), будет произведен сравнительный анализ его основных характеристик (производительность, функционирование при различных условиях окружающей среды) по сравнению с реализацией данного устройства по технологии СнК.

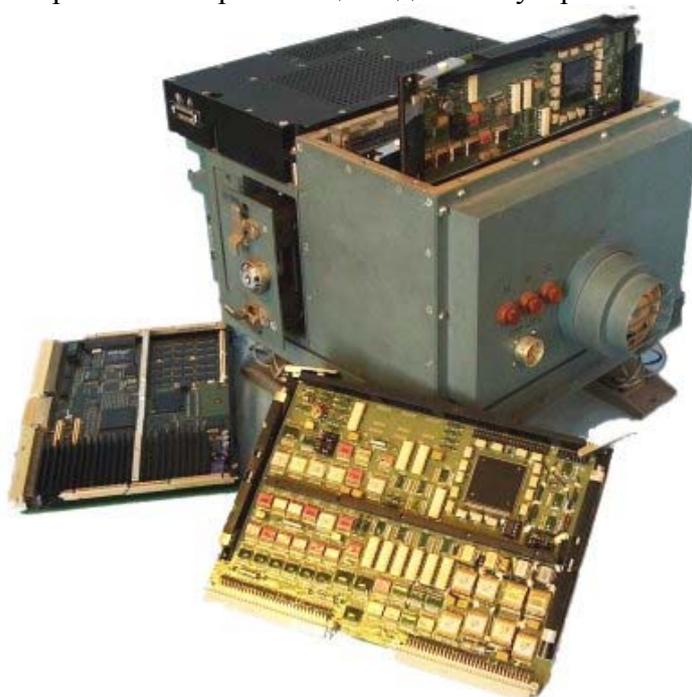


Рисунок 6 - Бортовое устройство связи, реализованное по технологии “система на плате”

Также будет произведен расчет стойкости разработанного по технологии СнК устройства на воздействие мощных импульсных электромагнитных помех на специальном оборудовании, которое включает в себя:

- разработку методов и средств защиты устройства;
- определение критических электромагнитных нагрузок на элементы устройства;
- исследование воздействия ЭМИ на устройство с учетом условий эксплуатации.

Заключение

Благодаря использованию технологии СнК есть возможность быстрой интеграции в систему новых узлов, как собственной разработки, так и сторонних производителей, что ускоряет создание новой конфигурации целевого изделия и снижает стоимость разработки, а также благоприятно отражается не только на конкурентоспособности продукции предприятия, но и на его возможности оперативно реагировать на изменяющиеся требования рынка.

Основная цель данной работы является разработка бортового устройства сбора и обработки информации по технологии “система на кристалле”. Эта технология пользуется огромной популярностью в мире и с каждым годом все больше устройств изготавливается именно по ней. Но производители отечественных бортовых устройств на сегодняшний день не охотно предлагает потребителям машины, которые основаны именно на технологии СнК. Для этого есть ряд причин:

- отсутствие научно обоснованной методики проектирования;
- не проводились исследования в области надежности;
- не проводились исследования на производительность;
- отсутствие исследований в области стойкости устройства реализованного по технологии СнК при воздействии ЭМИ;
- отсутствие исследований устройства реализованного по технологии СнК на параметрам ЭМС.

Поэтому, одна из главных задач работы разработать эффективные методы проектирования системы на кристалле на основе ПЛИС отечественного производства, с использованием IP - ядер, что позволит разработчикам бортового оборудования сократить сроки реализации проектов. Также необходимо произвести анализ по всем вопросам, которые волнуют потребителей бортового оборудования, таких как, производительность, надежность, стойкость к различным видам воздействий и т.п.

ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДУЛЕЙ ПАМЯТИ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Федосеев В.С.

Научный руководитель: Шпиев В.А.
ФГУП «НИИ «Аргон», Москва, Россия

Аннотация

В работе рассмотрены принципы проектирования бортовых вычислительных систем.

Введение

Вопрос постоянного хранения информации является одним из важнейших при создании любых информационных и вычислительных систем. Начиная от операционной системы и заканчивая базами данных, - все эти объекты требуют наличия в системе постоянных запоминающих устройств (ПЗУ).

Основные требования, предъявляемые к ПЗУ, реализуемым в рамках специальных приложений:

- Малые габариты;
- Высокая надежность;
- Высокая скорость обмена информацией;
- Стабильность работы при различных внешних воздействиях (в основном - температурных).

В данной работе рассматриваются различные архитектурные решения, позволяющие проектировать модули памяти, удовлетворяющие приведенным выше требованиям, в рамках специальных приложений.

Память на модуле

Размеры вычислительного устройства (системы) являются одним из важнейших критериев при построении специальных комплексов (бортовые ЭВМ, мобильные ВС, роботы и т.д.). Зачастую, в состав системы невозможно включить стандартные накопители информации (HDD, SSD и другие) именно из-за их габаритов. В таких случаях одним из решений могут стать FLASH микросхемы памяти, имеющие стандартные интерфейсы и размещаемые непосредственно на печатной плате вычислительного устройства.

Рассмотрим в качестве примера микросхемы NANDrive производства компании GreenLiant (ранее - SST). Структурная схема микросхем представлена на рис.1.

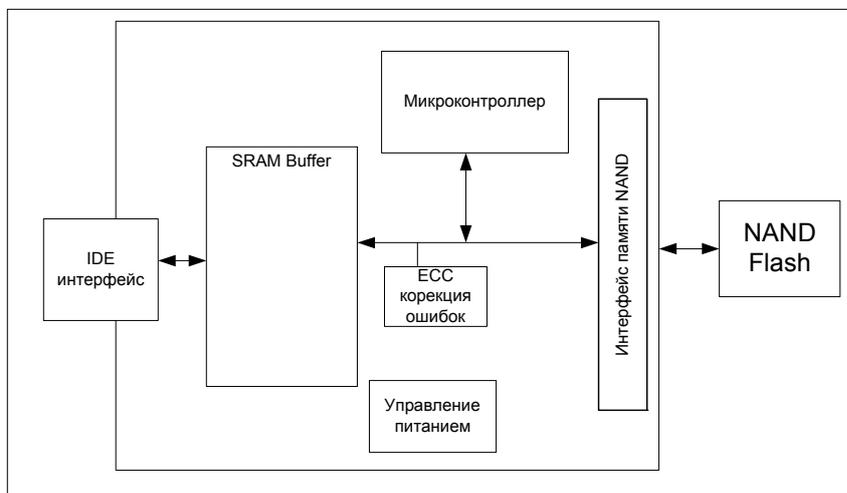


Рисунок 1 - Микросхема NANDrive с интерфейсом IDE

Представленная микросхема является полностью готовым к применению модулем памяти, содержащим в себе как непосредственно накопитель (NAND Flash) так и контроллер памяти, имеющей стандартный внешний интерфейс IDE (SATA). Размеры микросхем (12 x 24мм и 14 x 24 мм) позволяют размещать их на плате даже очень небольших габаритов. При этом относительно невысокая емкость может быть достаточна для установки ОС, а также хранения необходимой информации (базы данных, параметры работы и т.д.).

В таблицах 1 и 2 представлены основные характеристики различных микросхем из серии NANDrive.

Таблица 1 - Микросхемы NANDrive с интерфейсом IDE

Объем (Гб)	Тип (I-industrial, C-Commercial)	Скорость (МБ/сек)	
		Чтение	Запись
1	I	20	30
2	I	20	30
4	I	20	20
8	I	39	50
16	C	23	56

Таблица 2 - Микросхемы NANDrive с интерфейсом SATA

Объем (Гб)	Тип (I-industrial, C-Commercial)	Скорость (МБ/сек)	
		Чтение	Запись
4	I	до 120	до 60
8	I		
16	C		
32	C		
64	C		

Память в блоке

Основным типом накопителей, размещаемых в системном блоке ВМ, являются HDD (SSD) диски. Однако, в случае, если необходимо обеспечить скорость обмена данными выше, чем поддерживают стандартные диски, можно использовать накопители на PCI-Express модулях. Такие накопители представляют собой стандартную плату (модуль) с интерфейсом PCI-Express (x4 или x8), на которой размещены твердотельная память и контроллер. Пропускная способность каналов PCI-Express позволяет организовывать обмен данными на скоростях до 740Мб/с в режиме чтения и 700Мб/с в режиме записи, что дает заметный выигрыш в сравнении с обычными дисками.

Удаленные модули памяти

Помимо модулей ПЗУ, расположенных непосредственно в конструктиве ВМ, зачастую возникает необходимость во внешних накопителях, доступ к которым нужно

обеспечить с различных VM системы. Также такая необходимость возникает при создании переносимой памяти (подобной внешним HDD для персональных ЭВМ).

Одним из вариантов построения таких модулей памяти является применение технологии Ethernet для обеспечения обмена данными с внешним накопителем. Такой накопитель представляет собой стандартный жесткий диск (HDD) или твердотельный диск (SSD), помещенный в специальный бокс и управляемый контроллером, принимающим команды по Ethernet каналу (от коммутатора, например) и преобразующим эти команды в обычные ATA-команды (рис. 2).

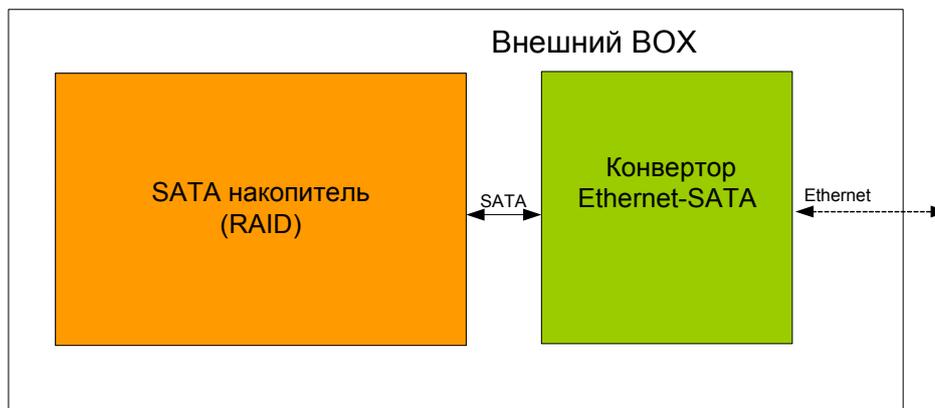


Рисунок 2 - Внешний накопитель с Ethernet контроллером
Структурная схема контроллера представлена на рис. 3.

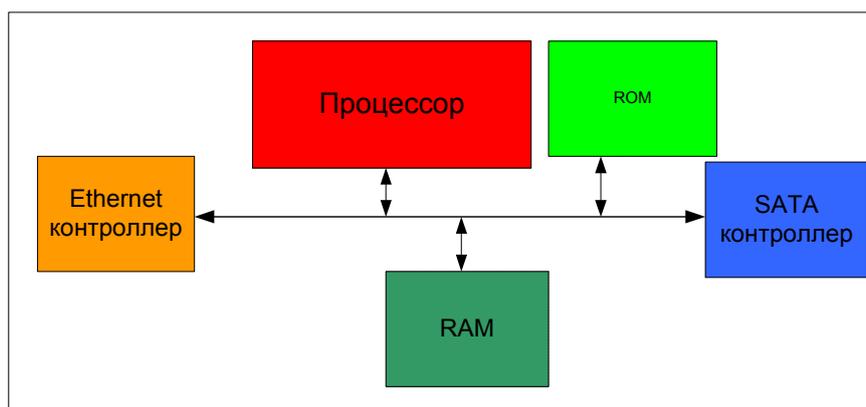


Рисунок 3 - Ethernet-SATA контроллер

Сопряжение контроллера с диском может быть осуществлено как по ATA, так и по SATA интерфейсу.

Защита информации

Вопросы защиты информации являются критическими во многих областях применения специальных приложений. Набор методов уничтожения информации достаточно широк – от программно управляемых алгоритмов стирания до физического уничтожения дисков.

Рассмотрим один из таких методов – аппаратное стирание информации. Этот метод позволяет за короткое время (не более 40сек) полностью стереть всю информацию, содержащуюся на диске без необходимости программного контроля за процессом стирания. Это становится возможным за счет введения на аппаратном уровне реализации алгоритмов стирания информации с накопителей.

В качестве примера будем рассматривать серию твердотельных накопителей InnoRobust производства компании InnoDisk. Диски InnoRobust поддерживают 2 основных режима стирания информации:

- QEraser – быстрое стирание;
- SEraser – стирание информации по заранее определенным алгоритмам.

Вызов функций уничтожения информации осуществляется:

- Посылкой специальной ATA-команды;
- Замыканием соответствующих контактов на корпусе диска.

Принцип действия описанных функций представлен на рис. 4.

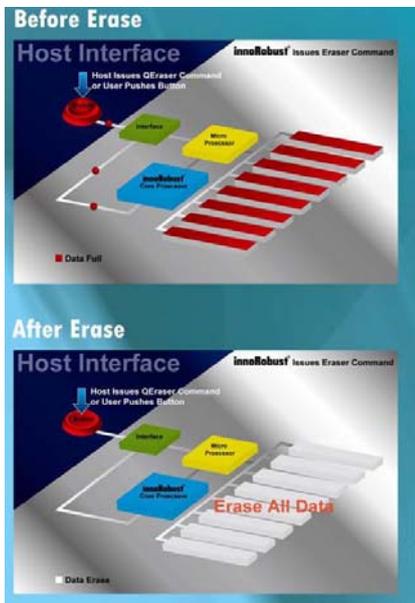


Рисунок 4 - Быстрое стирание информации

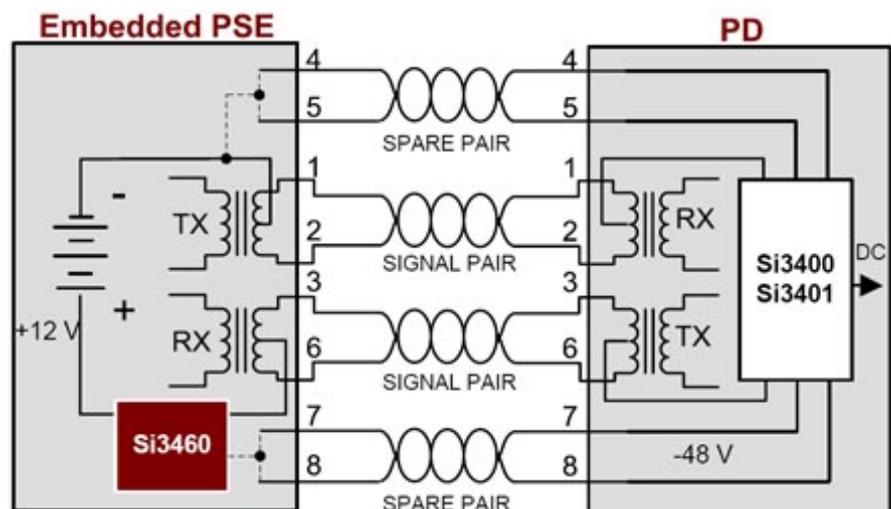


Рисунок 5 - Технология Power-over-Ethernet

Обеспечение питания удаленных модулей памяти

Очевидно, что к внешним модулям памяти, помимо информационных линий, необходимо прокладывать линии питания. Из-за ограничений на количество и размер кабелей такая задача может стать препятствием при создании подобных модулей.

В таких случаях подходящим решением может стать применение технологии Power-over-Ethernet (PoE IEEE 802.3af). Эта технология позволяет передавать электрическую энергию к устройству через стандартную витую пару в сети Ethernet. Стандарт выделяет два вида устройств: инжекторы PSE и потребители PD. Структурная схема устройств и канала связи между ними представлена на рис. 5.

Основные характеристики:

- передаваемое напряжение - 36-57В;
- макс. ток потр. – 400 мА;
- максимальная нагрузка – 12,95В.

Обмен данными с удаленными модулями памяти

Как было показано выше, при создании внешней модели памяти, возможно использование технологии Ethernet. При этом для согласования протоколов работы сети Ethernet и интерфейсов ATA (SATA) широкое применение находит технология ATA-over-Ethernet (AoE). Эта технология позволяет размещать стандартные ATA команды в Ethernet пакетах. Основным ее преимуществом является то, что технология не работает на уровнях выше Ethernet (TCP или IP), что облегчает ее использование как с точки зрения аппаратной поддержки, так и на программном уровне.

НАЧАЛЬНАЯ СТАДИЯ РОСТА ПЛЕНКИ: ФОРМИРОВАНИЕ ОСТРОВКОВЫХ НАНОСТРУКТУР

С.В. Сидорова, П.И. Юрченко
д.т.н., проф. Ю.В. Панфилов
кафедра МТ11 МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, РФ

INITIAL STAGE OF FILM GROWTH: FORMATION OF ISLAND NANOSTRUCTURES

S.V. Sidorova, P.I. Yurchenko
Dr. Sci. (Engineering), prof. Yu.V. Panfilov
BMSTU, Moscow, Russia

Аннотация

Приводятся результаты исследования формирования островковых наноструктур в вакууме методом термического испарения. Представлены экспериментальный стенд и методика контроля роста островковых наноструктур в процессе испарения меди. Показаны зависимости размеров островковых наноструктур от технологических параметров.

Abstract

Results of study nanostructures islet formation in vacuum by thermal evaporation are presented. The experimental stand and method of control growth of islet nanostructures during evaporation of copper are presented. The dependence of sizes of island nanostructures on the technological deposition parameters is shown.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что свойства тонкой пленки отличаются от свойств массивного материала, особенно если толщина пленки очень мала. Эта «особенность» определяется спецификой структуры пленки, которая в свою очередь, обусловлена процессами образования тонкой пленки. Существует большое количество методов и процессов получения тонких пленок (от прокатки до осаждения материала на подложку атом за атомом). Чаще всего тонкие пленки получают методами осаждения [1].

Образование тонких пленок в вакууме происходит в несколько этапов. Укрупнённо можно выделить следующие этапы образования пленки [2]:

- образование зародышей;
- рост зародышей, образование островков;
- коалесценция островков;
- образование каналов;
- рост сплошной пленки.

Для современной науки (разделы электроники: микро- и нанoeлектроника) и техники большой интерес представляют островковые пленки, то есть пленки, формирование которых завершили на этапе образования островков. Уникальные свойства (электронные, оптоэлектронные и др.) островковых пленок связаны с тем, что их размеры во всех трёх измерениях лежат в нанометровом диапазоне. Этот факт обуславливает эффект размерного квантования энергетических уровней электрона, находящегося внутри островковой наноструктуры (островка). Поведение электрона внутри наноразмерного островка подобно его поведению внутри трёхмерной потенциальной ямы. По этой причине островковые пленки или *островковые наноструктуры* (ОНС) диаметром от 2 до 10 нм получили название «квантовые точки» [3].

Сравнительно недавно стало известно о создании нанотранзистора с квантовыми точками в канале. Формирование квантовых точек в канале нанотранзистора позволяет в полной мере реализовать преимущества квантовых эффектов – туннелирование и размерное квантование энергетического спектра носителей заряда.

В настоящее время активно проводятся исследования по изготовлению вертикально излучающего лазера на квантовых точках. Работа лазера основана на наличии дискретного спектра уровней, между которыми могут происходить электронные переходы. Используется механизм инверсной заселенности уровней, при которой на более высокоэнергетичном уровне накапливается большее количество электронов, чем на уровне, лежащем ниже. Квантовые точки играют роль активных атомов.

Островковые структуры находят свое применение и в нанoeлектронике в качестве каталитических затравок для направленного выращивания *углеродных нанотрубок* (УНТ). Таким образом, актуальность применения ОНС очевидна и неоспорима.

Для создания квантово размерных наноструктур известны два подхода в технологии: «сверху-вниз» и «снизу-вверх». Технология «сверху-вниз» подразумевает организацию квантовых наноструктур при обработке макромасштабного объекта с постепенным уменьшением его размеров. Противоположный подход «снизу-вверх» состоит в том, чтобы набрать, соединить, выстроить отдельные атомы и молекулы в упорядоченную структуру [3].

ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования формирования островковых наноструктур были проведены на экспериментальном стенде, который состоит из:

- малогабаритной вакуумной установки модульного типа (рис. 1);
- пикоамперметра Keithley;
- блока питания и внутрикамерной оснастки.



Рисунок 1 - Малогабаритная вакуумная установка модульного типа

Суть экспериментальных исследований заключалась в том, что в процессе нанесения материала на подложку в вакууме происходит измерение силы тока с подложки (т.к. проявляется туннельный эффект между сформированными островковыми наноструктурами). Для того чтобы было возможно измерить силу тока, на подложку предварительно наносят контактные площадки, которые замыкают в предварительно собранную цепь для измерения силы тока (рис. 2). В качестве материала подложки использовали ситалл и кремний.

Для формирования островковых наноструктур был выбран метод термического испарения [3]. Экспериментальные исследования проводили при нанесении на подложки (из ситалла или кремния) меди. В момент начала испарения меди включали пикоамперметр фирмы Keithley, с помощью которого фиксировали значение силы тока между контактными площадками. Процесс останавливали при достижении значения силы тока на пикоамперметре 25, 250 и 2500 нА.

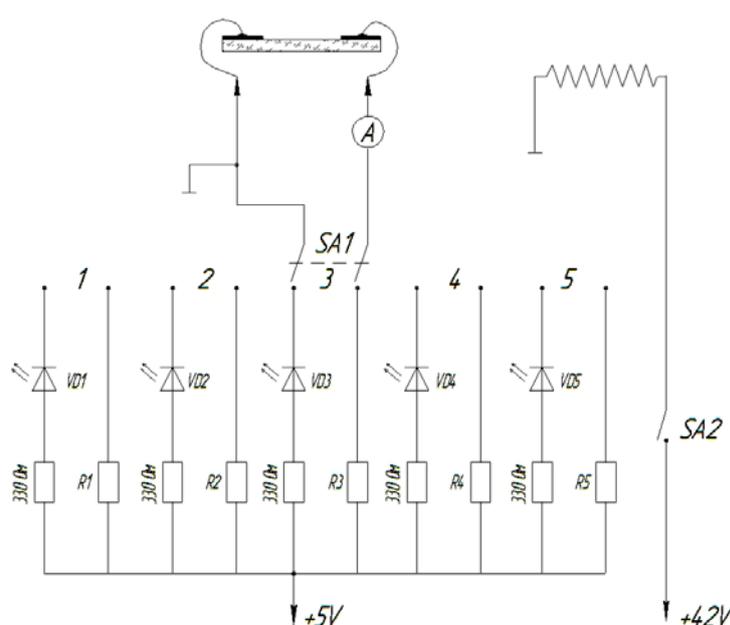


Рисунок 2 - Электрическая схема измерения силы тока

На рис. 3 представлена одна из полученных зависимостей силы тока от времени напыления меди на ситалловую подложку. Точка *A* свидетельствует о появлении тока на подложке. Это свидетельствует о начале образования островковых наноструктур и протекании туннельного тока между островками. В момент, когда ток достиг точки *B*, была закрыта заслонка и остановлен процесс испарения меди. После точки *B* ток начинает уменьшаться (примерно до 10 нА). Падение силы тока является объектом дальнейших исследований. Причиной этому может служить появившийся сорбат на поверхности подложки, который препятствует протеканию тока. Вероятно, уменьшение силы тока объясняется потоком натекания атмосферного воздуха, влияние которого при прекращении испарения меди, становится существенным.

I , нА

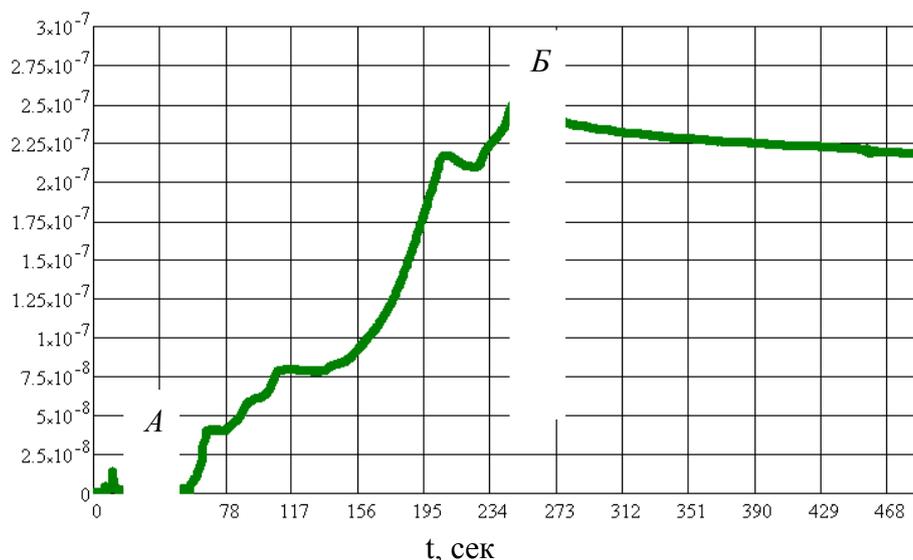


Рисунок 3 - Зависимость силы тока от времени в процессе нанесения меди на ситалловую подложку

Были проведены эксперименты для каждого диапазона силы тока. Далее образцы были исследованы с помощью сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) SolverNEXT фирмы NT-MDT на предмет топологии получившихся структур и их размеров (рис. 4, 5).

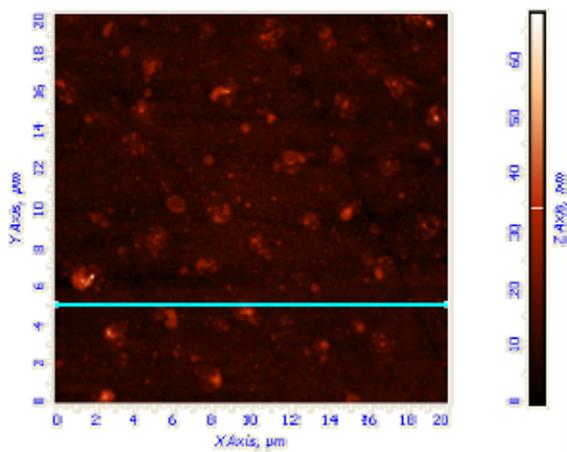


Рисунок 4 - 2D-изображение островков меди на ситалловой подложке при токе 25 нА, размер области сканирования 20х20 МКМ

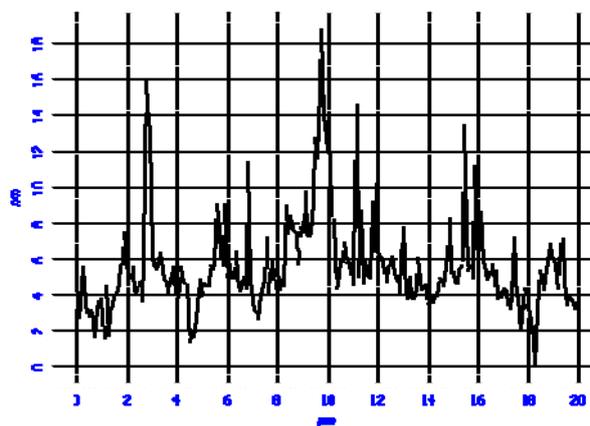


Рисунок 5 - Шероховатость островков меди на ситалловой подложке при токе 25 нА

При анализе полученных сканов выявлено, что при токе 25 нА средний размер островковых наноструктур достигает 18 нм, а при токе 250 нА – 35 нм. Таким образом, фиксируя то или иное значения тока на пикоамперметре (25, 250 и 2500 нА), появляется возможность получать островковые наноструктуры заданного размера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты позволили проанализировать режимы формирования ОНС методом термического испарения в вакууме. Исследования сканов образцов на АСМ определили, что при увеличении силы тока на образце расстояния между ОНС сокращаются, неравномерность высот по поверхности подложки уменьшается. Также при анализе полученных сканов выявлено, что при токе 25 нА средний размер островковых наноструктур достигает 18 нм, а при токе 250 нА – 35 нм.

Литература

1. L. Maissel, R. Glang. Handbook of Thin Film Technology. McGraw Hill Hook Company, 1970. V. 2. 768 p.
2. Борзяк П.Г., Кулюпин Ю.А. Электронные процессы в островковых металлических пленках. К.: Наукова думка. 1980. 240 с.
3. Панфилов Ю.В., Сидорова С.В. Методы формирования островковых наноструктур / Высокие технологии в промышленности России // Материалы XV Междунар. научн. техн. конф. М.: ЦНИТИ Техномаш, 2009. С. 372–375.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы ГК №02.740.11.0013.