

## СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Одним из актуальных направлений современной науки являются нанотехнологии. Не смотря на то, что электропривод, как правило, ассоциируется с относительно габаритными и мощными устройствами, возможно, в микро- и нанотехнологиях существует ниша и для него.

**Целью** статьи является обобщение достижений в области микроэлектромеханических систем (МЭМС) и наноэлектромеханических систем (НЭМС), которые с каждым годом получают все большее распространение. Несомненно, развитие этих систем потребует знаний классической теории электропривода и, возможно, приведенная информация заинтересует ученых-электроприводчиков и побудит их посвятить себя исследованию и созданию микро- и наноэлектромеханических систем.

Одним из направлений развития и совершенствования техники является интеграция и миниатюризация оборудования. Примером этому являются электромеханика и мехатроника. Интеграция на кристалле элементов электроники, механики, информатики и измерительной техники привела к объединению этих технологий в конце 80-х – начале 90-х годов и созданию микросистемной техники (МСТ) и появлению МЭМС. Развитие нанотехнологий приводит к созданию НЭМС.

По размерам изделия разной степени миниатюризации принято классифицировать следующим образом [1]:

- электромеханика и мехатроника > 1 мм;
- микросистемная техника или микроэлектромеханические системы 1 ÷ 1000 мкм;
- наноэлектромеханические системы и нанотехнологии 1 ÷ 100 нм.

Наноструктуры находятся на границе самых малых из созданных человеком устройств и наибольших молекул живых организмов. МЭМС и НЭМС рассматривают все свойства структур независимо от принципа их функционирования: физического (электромагнитного, оптического, квантово-механического), химического, биологического.

Благодаря малым размерам МЭМС приобретают уникальные свойства, не характерные для макроскопических объектов в силу более высокого отношения площади поверхности к объему: повышенную чувствительность к статическому (поверхностному) электричеству и смачиваемость (действие сил поверхностного натяжения). Характерной особенностью МЭМС является синергетическое (взаимоусиливающее положительные свойства) взаимодействие электрических и механических связей.

### Структура МЭМС

Общая структура МЭМС идентична классической разомкнутой, при этом является интегрированной и включает в себя чувствительные элементы (датчики информации или сенсоры), каналы передачи энергии и информации, управляющие устройства, исполнительные механизмы (двигатели или актюаторы) [2] и может быть представлена на рис. 1 [3]

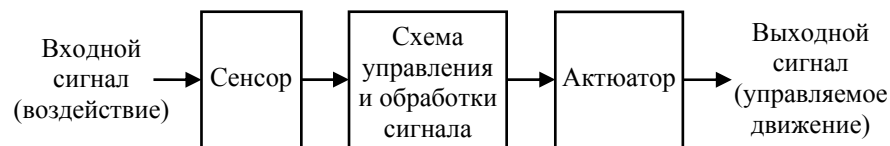


Рис. 1 Общая структура МЭМС

К микроэлектромеханическим устройствам относятся полупроводниковые датчики давления, акселерометры (широко используются в качестве чувствительных элементов при срабатывании подушек безопасности автомобилей), рис. 2 [4], гироскопы (основа навигационных измерителей), микрофоны, а также широкий ряд актюаторов, в том числе сопла головок струйных принтеров, матрицы микрозеркал, биочипы, радиочастотные и акустические фильтры. Основные потребители МЭМС – оборонная и автомобильная промышленность, робототехника, медицина и мобильные устройства.

Известен американский миниатюрный летательный аппарат с параметрами: масса - 80 г; размах крыльев - 15 см; высота полета - 230 м; скорость 70 км/час; время полёта - 30 мин; радиус действия - 1,8 км; КПД двигателя - 82%; две видеокамеры весом 2 г; передача изображений на 2 км [5]. Самый миниатюрный подводный аппарат серии MicroHunter с дальностью действия 30 км, имеет длину 5 см и массу 5 г. Их системы управления обеспечивают эффективное применение достаточно большой группировки (более 50 микроаппаратов) для решения задач сбора трехмерной информации о подводных объектах.

В медицине необходимы приводы с габаритными размерами в пределах одного миллиметра с крутящим моментом до нескольких десятых микроньютометра. При общем диаметре редуктора, равном 1,9 мм, зубчатые колеса отдельных ступеней имеют диаметр не более 0,5 мм, рис. 3 [4].

Проектирование МЭМС требует не только совместных усилий специалистов в области механики и электроники, но и дополнительных фундаментальных исследований в области физики, химии, материаловедения. Существующие ГОСТы распространяются на модули до 0,1 мм и уже не охватывают достигнутых значений, равных 30—40 мкм.

Технологической базой МЭМС являются технологии микроэлектроники с возможностью создания трехмерных структур. При этом в традиционной полупроводниковой КМОП-технологии кремниевая подложка используется еще и в качестве конструкционного материала для механических узлов. Кроме того, для изготовления микромеханических деталей используются фрезерование, формовка, алмазная и микроэрозионная обработка, волоконная технология, 3D-МЭМС термокомпрессионная сварка, технология формирования объемных структур с использованием синхронного излучения, гальванического осаждения и прецизионного литья полимерами (LIGA-технология) [6]. Но необходимо отметить перспективность только тех из них, которые могут обеспечить массовое серийное изготовление.

#### Программное обеспечение для проектирования МЭМС

Особенность МЭМС-компонент состоит в чрезвычайно малых расстояниях между проводниками, в необходимости тщательного учета механических и электрофизических свойств используемых материалов, в теснейшей связи трехмерной конструкции с технологическими возможностями ее изготовления, в необходимости учета множества параметров электродинамического взаимодействия близко расположенных узлов и проводников. Поэтому при их проектировании и моделировании велика роль специализированного программного обеспечения.

Наиболее известные программные пакеты проектирования МЭМС (COVENTOR, VeloceRF, ANSYS, SUGAR, FEMLAB, Momentum ADS, CST Microwave Studio) поддерживают анализ электростатических эффектов в двух- и трехмерной неоднородной среде с потерями, расчет термомеханических параметров и переходных процессов с учетом гистерезиса, тепловых деформаций, упругих эффектов; эффектов, связанных с упаковкой изделия в корпус; а также трехмерный электродинамический анализ полей в неоднородной среде с потерями. В пакеты обычно входит модуль разработки структурных и принципиальных схем с использованием поведенческих моделей электромеханических устройств, а также типовых радиоэлементов. Необходимы также библиотеки параметров материалов; редакторы послыного описания топологии двумерных подсистем и объединения их в трехмерную структуру; эмулятор доступных технологических процессов с вводом множества его параметров; модуль визуализации результатов.

#### Уровень интеграции

Микросистемная техника развивается на стыке множества отраслей науки и техники. Для оценки состояния и перспектив развития микроэлектромеханических систем [7] используется коэффициент  $K_{TM}$ , позволяющий оценить уровень интеграции МЭМС и представляющий собой произведение числа транзисторов -  $T$  в изделии на число механических компонент -  $M$ . Для серийно выпускаемого акселерометра, изготавливаемого по технологии с топологическими нормами 2...10 мкм (содержащего 100...200 транзисторов и 1 механический элемент), получим  $K_{TM} = 10^2$ ; а для динамического управления поверхностью экрана дисплея (содержащего 1 млн. механических элементов экрана и 1 млн. управляющих транзисторов)  $K_{TM} = 10^{12}$ . В соответствии с этим критерием перспективными являются движущиеся системы, устройства памяти объемом 1 Тб/см<sup>2</sup>, оптомеханические дисплеи, системы распределенного управления конструкциями и др.

#### Наноэлектромеханические системы

Наноэлектромеханические системы появляются в результате развития нанотехнологий и используют предельные возможности электрических, магнитных, механических и биологических систем.

Развитию НЭМС способствовали следующие открытия последнего двадцатилетия:

- создание углеродных нанотрубок и применение зондов микроскопов и литографических методов для сборки получаемых трубок в отдельные устройства;
- возможность размещения сконструированных отдельных молекул в зазоре между электродами и измерения переноса заряда через эти молекулы;
- развитие зондовых методов для манипулирования отдельными атомами вещества и создания наноструктур;
- разработка химических методов синтеза нанокристаллов и методов их объединения в более крупные упорядоченные структуры;
- выделение биохимических «молекулярных двигателей» и их включение в небιологическую среду [8].

Элементной базой НЭМС и наноробототехники являются углеродные каркасные структуры – большие молекулы, состоящие из атомов углерода. Наиболее известная из таких структур – фуллерен  $C_{60}$ . В 1991 г. были обнаружены длинные цилиндрические углеродные образования, получившие названия нанотрубок (УНТ). Это одни из первых наноструктур, построенных на молекулярном уровне и обладающих исключительными физическими и электрическими свойствами (табл. 1).

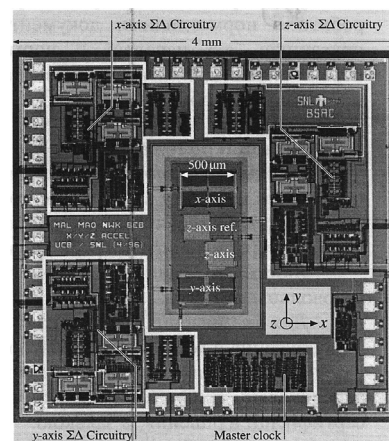


Рис. 2 Трехосный акселерометр на кремниевой основе с интегрированным интерфейсом и системой управления

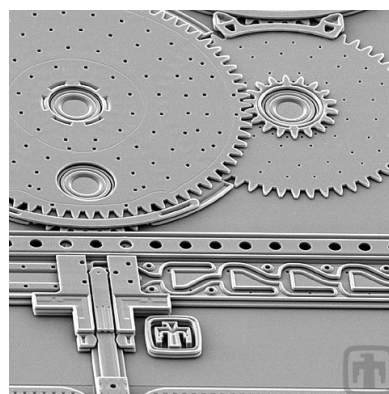


Рис. 3 Фрагмент редуктора МЭМС (диаметр шестерни не более 0,5 мм)

Таблица 1. Свойства углеродных нанотрубок

Свойства	Характеристики	Значения	Возможное применение в наноробототехнике
Геометрические	Анизотропия размеров	10 ÷ 1000	Структурные элементы, зонды, пинцеты, ножницы, шприцы
	Диаметр	0,4 нм ÷ > 3 нм (однослойные) 1,4 нм ÷ > 100 нм (многослойные)	
	Длина	Несколько микрон	
Механические	Модуль Юнга	1 ТПа (сталь 0,2 ТПа)	Актуаторы, переносчики, шприцы переключатели, элементы памяти
	Прочность на разрыв	45 ГПа (сталь 2 ГПа)	
Электрические	Плотность	1,33÷1,4 г/см <sup>3</sup> (алюминий 2,7 г/см <sup>3</sup> )	Диоды, транзисторы, переключатели, логические схемы, провода, сенсоры
	Межслоевое трение	Сверхмалое	
Термические	Проводимость	Металлическая/полупроводниковая	Сенсоры, термические актуаторы
	Макс. плотность тока	1 ТА/ см <sup>3</sup> (медь 1 ГА/ см <sup>3</sup> )	
	Теплопроводность	> 3 кВт/мК (алмаз 2 кВт/мК)	

Под действием механических напряжений, превышающих критические, нанотрубки не разрушаются, а перестраиваются. В зависимости от конкретной схемы сворачивания графитовой плоскости, нанотрубки могут быть проводниками или полупроводниками.

Возможно очевидное применение нанотрубок в качестве очень прочных микроскопических стержней и нитей. Прочность нанотрубки на порядок больше, чем у стали. В настоящее время максимальная длина нанотрубок составляет сотни микрон, но постепенно увеличивается и доходит до миллиметрового рубежа.

Созданы опытные образцы полевых транзисторов на основе одной нанотрубки: при запирающем напряжении в несколько вольт проводимость однослойных нанотрубок может изменяться на 5 порядков. В наноробототехнике УНТ можно применять в качестве структурных элементов, инструментов, сенсоров и актуаторов.

Одиночная УНТ сама по себе также может являться функциональным элементом наноустройств. Один из примеров такого устройства – зонд из нанотрубок для атомно-силового микроскопа, позволяющий увеличить разрешение микроскопа и защитить острие от разрушения. Другим примером наноустройства является нанопинцет, держатели которого представляют собой нанотрубки, соединённые со стеклянным капилляром. Управление зажимами происходит с помощью подачи разности потенциалов между ними.

В многостенной нанотрубке отдельные слои связаны между собой слабыми ван-дер-ваальсовыми связями, вследствие чего они легко двигаются друг относительно друга. Такие УНТ можно применять как гигагерцовые резонаторы и осцилляторы, трубчатые переключатели, элементы памяти, шприцы, линейные наносерводвигатели со встроенным устройством для определения положения, как вращательные элементы для НЭМС [9].

В настоящее время можно выделить две основные тенденции в создании НЭМС: уменьшение размера существующих МЭМС и разработка принципиально новых молекулярных двигателей и электромеханических устройств. Первый подход связан с большими сложностями, поскольку методы, используемые для создания МЭМС (электронная литография, ионное травление и др.) имеют ограниченное разрешение, поэтому их проблематично использовать для создания нанообъектов. Как ожидается, НЭМС произведут революцию в области метрологии, особенно – при измерении чрезвычайно малых сил и смещений на молекулярном уровне. В настоящее время на основе НЭМС созданы нанорезонаторы с частотой колебаний выше 10 ГГц. Они уже нашли применение в сканирующей зондовой микроскопии, нановесах и наносенсорах биологических молекул и ДНК. Другим очевидным преимуществом НЭМС является их низкое энергопотребление. К одному из важнейших классов НЭМС можно отнести также и наноактуаторы – молекулярные моторы. В микро- и наносистемах вместо электромагнитного принципа преобразования энергии часто используют пьезоэлектрический или электростатический эффекты; в зависимости от выбора принципа работы наноустройств подвод энергии к микро- или наноэлектромеханической системе может осуществляться также электрически, термически или химически. Электрические наноактуаторы управляются приложением внешней разности потенциалов или электромагнитного поля. Исследователи из Беркли (США) создали электрический наноактуатор, похожий на обычный электромотор. Вращающаяся часть – золотая пластинка размером около 250 нм, которая закреплена на оси – углеродной нанотрубке. Вокруг ротора расположено три электрода – два по бокам и один снизу. При подаче на электроды переменного напряжения 5В, ротор вращается. В основе работы тепловых актуаторов лежит эффект теплового расширения или деформации контакта двух материалов за счет различия в коэффициентах теплового расширения. Разогрев элементов проводят, пропуская через них ток или нагревая окружающую среду. Такие актуаторы могут создавать достаточно большие силы, однако эффективность использования энергии не превышает 0,1%.

Разработка искусственных НЭМС является сложнейшей задачей, однако, природой созданы различные наномеханические устройства. Многие известные биологические системы – вирусы, бактерии, одноклеточные микроорганизмы и др. имеют различные приспособления, позволяющие им перемещаться в зависимости от поведения окружающей среды, в том числе под действием электрических импульсов нейронов. Поэтому одним из актуальных направлений в области создания НЭМС является не только разработка принципиально новых, а подражание уже известным природным молекулярным моторам. Химическое управление такими наноактуаторами осуществляется при помощи изменения состава окружающей среды. Иногда используют свет, который, воздействуя на молекулы, приводит актуатор в движение. К химическим наноактуаторам относятся и биоло-

гические молекулярные моторы. Примером такого мотора может быть устройство, способное выталкивать и втягивать сделанный из молекулы ДНК стержень со скоростью почти 190 нанометров в секунду, а общее перемещение может достигать 3 микрометров. Диаметр этого стержня 2 нанометра. В качестве источника питания двигатель использует молекулы АТФ (аденозинтрифосфорной кислоты) – стандартный источник энергии, которым пользуются живые клетки. Существует много других наноактюаторов, сделанных из биологических молекул, полимеров, кремния и других материалов. Для электромеханических систем существенным является интеграция с электронными компонентами. С учетом размерного фактора НЭМС, речь должна идти о наноэлектронике. Однако, развитой компонентной базы наноэлектроники пока нет. Поэтому возникает дополнительная проблема интерфейса с компонентной базой микроэлектроники.

#### **Основные тенденции развития**

**В мире** число зарегистрированных патентов в области нанотехнологий с 1976 г. составило 88546, из них 64% принадлежат США. В 2006 г. объемы продаж МЭМС в 7,65 млрд. долл. были распределены следующим образом: инъекционные головки 30%, датчики давления и потока 20%, инерциальные датчики 16%, микрооптоэлектромеханические системы (МОЭМС) 13%, био-МЭМС 7%, радиочастотные МЭМС 4%, МЭМС для контактирующих устройств 4%, ИК-сенсоры 3%, МЭМС-микрофоны 1%. В 2007 году объем мирового рынка нанотехнологий составил 146,4 млрд. дол. Ожидается, что к 2015 г. он превысит 1 триллион долл.

**В России** с 1999 г. издается ежемесячный междисциплинарный теоретический и прикладной научно-технический журнал «НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА», в период с 2004 по 2007 г.г. открыто еще четыре журнала, в 2000 г. открыта специальность «Микросистемная техника», в 2003 – «Нанотехнологии в электронике» и «Наноматериалы», действует ГОСТ РВ 0159-002-2008 «Микросистемная техника военного назначения. Термины и определения». В 2007 г. утверждена «Стратегия развития nanoиндустрии», в соответствии с которой были созданы ГК «Роснано» с начальным уставным капиталом в 130 млрд. руб., выделенных из бюджета, и правительственный Совет по нанотехнологиям. В 2008 г. принята «Программа развития nanoиндустрии в Российской Федерации до 2015 года». На региональном уровне планируется создать и модернизировать более 15 ключевых производств и порядка 50 центров проектирования СБИС типа «система на кристалле» и межотраслевой центр шаблонов. Расходы России на поддержку и развитие работ в области наноматериалов и нанотехнологий оцениваются в размере нескольких десятков миллионов долл. Не смотря на это, доля России в общемировом технологическом секторе составляет около 0,3%, а на рынке нанотехнологий – 0,04%. Россия обратила свое внимание на наноразработки на 7–10 лет позже, чем зарубежные страны.

**В Украине** еще большее отставание в области нанотехнологий. Ее нет в списке стран, которые имеют национальные нанотехнологические программы. Национальная академия наук Украины разработала проект концепции комплексной программы фундаментальных исследований «Наноструктурные системы, наноматериалы, нанотехнологии». В официальных документах, принятых на парламентском, президентском или правительственном уровне, термин «нанотехнология» отсутствует. Проводятся лишь отдельные несистемные фундаментальные и прикладные исследования. В стране нет современной инструментальной базы, которая позволяла бы в полном объеме манипулировать объектами в области нанометра, пришли в упадок отраслевые научно-промышленные центры, которые могли бы использовать результаты академической, вузовской и прикладной науки в производственных целях.

#### **Выводы**

Микросистемная техника и нанотехнологии развиваются революционно, с опережением закона Мура, в соответствии с которым число транзисторов на кристалле удваивается каждые 1,5 – 2 года. Интенсивное возрастание объемов продаж МЭМС и финансирования нанотехнологий и НЭМС свидетельствуют о целесообразности привлечения внимания специалистов классического электропривода, определения их роли и участия в исследованиях и создании МЭМС и НЭМС.

Основные исследования в данной области можно отнести к области физики, химии, биологии, материаловедения, микроэлектроники, причем большинство достижений происходит на стыке наук. При разработке микро- и наноактюаторов помимо электромагнитного, используется широкий спектр методов получения механической энергии: электростатический, пьезоэлектрический, тепловой, биохимический и другие. В данный момент усилия специалистов-электромехаников могут быть направлены на разработку математических моделей микроэлектромеханических устройств, создание элементов САПР, моделирование МЭМС и НЭМС.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1 Мальцев П.П. О классификации в области микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2005. №1. С. 9-10. 2 Гірняк Ю. Мікроелектромеханічні системи у сучасному приладобудуванні // Вимірвальна техніка та метрологія, № 69, 2008. 3 Теслюк В.М. Побудова множини можливих рішень з допомогою І-АБО-дерева при вирішенні задач структурного синтезу на системному рівні проектування МЕМС // Науково-технічний журнал «Інформаційні технології і системи». – Львів. – 2006. - Том 9, № 1. – С.101- 108. 4 Bhushan B. Handbook of nanotechnology. – Springer, 2004. 5 Макаров И.М. и др. Интеллектуальная система управления автоматической посадкой беспилотного летательного аппарата на основе комплексного применения технологии нечеткой логики // Новые методы управления сложными системами. Москва, Наука, 2004. 6 Невлюдов И.Ш., Андрусевич А.А., Палагин В.А. Микроэлектромеханические системы и нанотехнологии. – Харьков: Коллегиум, 2007. 7 Бочаров Л.Ю., Мальцев П.П. Состояние и перспективы развития микроэлектромеханических систем за рубежом // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 41–46. 8 Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований / М.К. Роко, Р.С. Уильямс, П. Аливисатос. – М.: Мир, 2002, 292 с. 9 Нанотехнологии. Наноматериалы. Наносистемная техника. Мировые достижения – 2008 год / Мальцев П.П. – М.: Техносфера, 2008, 430 с.