

# НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 11 (112) ✧ 2009

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий  
и информационных технологий Российской Академии наук

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России  
и в систему Российского индекса научного цитирования

Издается с 1999 г.

Главный редактор

Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В.

Редакционный совет:

Аристов В. В.

Асеев А. Л.

Гапонов С. В.

Каляев И. А.

Квардаков В. В.

Климов Д. М.

Ковальчук М. В.

Нарайкин О. С.

Никитов С. А.

Сауров А. Н.

Сигов А. С.

Чаплыгин Ю. А.

Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И.

Андреевский Р. А.

Антонов Б. И.

Арсентьева И. С.

Астахов М. В.

Быков В. А.

Волчихин В. И.

Горнев Е. С.

Градецкий В. Г.

Гурович Б. А.

Захаревич В. Г.

Кальнов В. А.

Карякин А. А.

Колобов Ю. Р.

Кузин А. Ю.

Мокров Е. А.

Норенков И. П.

Панич А. Е.

Панфилов Ю. В.

Петросянц К. О.

Петрунин В. Ф.

Путилов А. В.

Пятышев Е. Н.

Серебряников С. В.

Сухопаров А. И.

Телец В. А.

Тимошенко С. П.

Тодуа П. А.

Шубарев В. А.

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Григорин-Рябова Е. В.

Чугунова А. В.

Учредитель:

Издательство  
"Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

### НАНОТЕХНОЛОГИИ

**Заблоцкий А. В., Мелентьев П. Н., Шешин Е. П., Батурич А. С., Балыкин В. И., Коростылев Е. В., Лапшин Д. А., Кузин А. А.** Применение виртуального растрового электронного микроскопа для определения диаметра проецирующей микролинзы атомного нанолитографа . . . . . 2

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

**Акопьян В. А., Панич А. А., Рожков Е. В., Шевцов С. Н.** Измерительно-информационный комплекс для моделирования и демпфирования колебаний элементов летательных аппаратов . . . . . 7

**Гуреев А. В., Воронин С. Е.** Метод формирования треугольных импульсов для сверхширокополосных беспроводных систем . . . . . 14

### МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

**Ветров С. И., Горохов В. С., Скворцов А. В., Чмырь Д. А., Скворцова Д. А.** Системный подход к проектированию распределенных нанотехнологических производственных систем . . . . . 17

**Кондрашин А. А., Слепцов В. В., Лямин А. Н.** Формирование цветного изображения органическими светодиодами . . . . . 27

### ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

**Белкин М. Е., Белкин Л. М.** Исследование эффективности применения полупроводникового лазерного излучателя для передачи многоканального аналогового сигнала СВЧ диапазона . . . . . 32

**Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е.** Тонкопленочные тензорезисторные микроэлектромеханические системы с идентичными тензоэлементами и мембранами, имеющими жесткий центр . . . . . 38

**Гуляев Ю. В., Лобанов Б. С., Митягин А. Ю., Фесенко М. В., Хлопов Б. В.** Прибор для уничтожения информации с флеш-носителей. . . . . 42

### ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

**Иванников Д. И.** Применение теории распознавания образов при конструировании химических мембран. . . . . 46

**Алфимов С. М.** О введении стандартов по микросистемной технике. . . . . 50

### СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

**Губарев В. А.** Моделирование времени выполнения алгоритмов в системных моделях цифровых устройств, реализуемых в СБИС класса "Система на кристалле" . . . . . 52

**Contents** . . . . . 55

Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайтах журнала (<http://www.microsystems.ru>) и научной электронной библиотеки (<http://elibrary.ru>). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на сайте журнала: с 1999 г. по 2003 г. в разделе "ПОИСК СТАТЕЙ" и 2008 г. — в разделе "АРХИВ".

### ПОДПИСКА:

- по каталогу Роспечати (индекс 79493);
- по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)
- в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10)

Адрес для переписки:  
e-mail: nmst@novtex.ru

УДК 53.088

**А. В. Заблоцкий**<sup>1</sup>, науч. сотр.,  
e-mail: zablotskiy@ckrmipt.ru,

**П. Н. Мелентьев**<sup>2</sup>, канд. физ.-мат наук, науч. сотр.,

**Е. П. Шешин**<sup>1</sup>, д-р физ.-мат наук, проф.,

**А. С. Батурич**<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, зам. декана,

**В. И. Балыкин**<sup>2</sup>, д-р физ.-мат. наук, глава  
лаборатории,

**Е. В. Коростылев**<sup>1</sup>, науч. сотр.,

**Д. А. Лапшин**<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр.,

**А. А. Кузин**<sup>1</sup>, науч. сотр.,

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

<sup>2</sup> Институт спектроскопии Российской академии  
наук

## ПРИМЕНЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО РАСТРОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИАМЕТРА ПРОЕЦИРУЮЩЕЙ МИКРОЛИНЗЫ АТОМНОГО НАНОЛИТОГРАФА

*Представлены результаты измерения геометрических параметров объекта, размер которого сравним с диаметром электронного зонда РЭМ — сквозного отверстия диаметром менее 50 нм, изготовленного в ультратонкой мембране (толщиной менее 50 нм), используемого в качестве микролинзы в атомно-проекционном нанолитографе. Впервые в микроскопии таких нанообъектов был применен подход, основанный на дополнении экспериментальных данных стандартного РЭМ результатами моделирования, полученных с помощью "виртуального РЭМ".*

**Ключевые слова:** РЭМ, нанометрология, атомная оптика, нанолитография.

В настоящее время активно развиваются различные подходы литографии на поверхности, которые привели к возможности создавать атомные и молекулярные наноструктуры с характерными размерами менее 50 нм [1]. Большинство этих методов разрабатывалось для приложений в области микро- и наноэлектроники и имеют ряд существенных ограничений при их использовании в других областях.

Существует ряд альтернативных подходов нанолитографии, позволяющих создавать наноструктуры с характерным пространственным размером менее 20 нм [2–4]. Одним из таких альтернативных подходов является нанолитография, основанная на ме-

тодах атомной оптики, позволяющих с высокой точностью управлять пространственными степенями свободы нейтральных атомов и молекул [5–7].

Среди различных способов создания наноструктур методами атомной оптики в практическом плане наиболее развитым оказался метод, основанный на использовании атомной камеры-обскуры [8]. К настоящему времени с помощью атомной камеры-обскуры (рис. 1) продемонстрирована возможность литографии атомных наноструктур произвольной заданной геометрии с размером минимального элемента наноструктуры около 30 нм [9]. В этом подходе с помощью атомов на подложке создается уменьшенное изображение маски, которая задает форму создаваемых наноструктур. Для этого пучок атомов пропускают через маску с отверстиями, формируя по аналогии с оптикой фотонов "светящийся объект" заданной геометрии. Атомы, прошедшие через маску, поступают на мембрану, отстоящую от маски на расстоянии  $L \approx 1 \div 5$  см, содержащую большое число отверстий — "микролинз" диаметром 20–300 нм. Каждая "микролинза" является камерой-обкурой и формирует на поверхности подложки, находящейся от мембраны на расстоянии  $l \approx 1 \div 20$  мкм, изображение маски, уменьшенное в  $10^3$ – $10^4$  раз. В результате на подложке создается массив идентичных атомных наноструктур.

В методе литографии на основе атомной камеры обскуры размеры элементов создаваемых наноструктур определяются следующими параметрами эксперимента:

- "уменьшающей силой" камеры-обскуры, задаваемой отношением  $M = L/l$ , где  $L$  — расстояние от маски до мембраны,  $l$  — расстояние от мембраны до подложки;
- размером и формой наноотверстия;
- длиной канала наноотверстия;
- значением длины волны де Бройля используемых атомов.

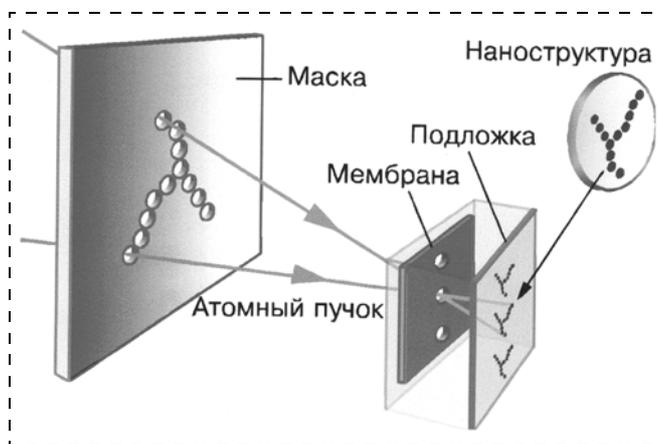


Рис. 1. Схема нанолитографии на основе атомной камеры-обскуры

Минимально возможный размер создаваемых наноструктур достигается при значениях диаметра нанотверстий менее 50 нм. Вариации диаметра нанотверстий существенно влияют на характерные размеры создаваемых наноструктур [9]. Создание нанотверстий с заданными параметрами является чрезвычайно важной задачей для производства наноструктур с требуемыми геометрическими размерами, а также для реализации предельного разрешения развиваемого метода.

Изготовление отверстий, имеющих диаметр в нанометровом диапазоне, является сложной задачей, имеющей как фундаментальные, так и технические ограничения. Одним из методов создания мембран с нанотверстиями является метод, использующий энергию ускоренных ионов. При этом существуют два подхода:

- использование ионов с энергией в диапазоне 1–100 кэВ;
- использование ионов с энергией от 100 кэВ до 3 МэВ.

Низкоэнергетические ионы (энергия менее 100 кэВ) используются в режиме острого фокусированного пучка (диаметром в несколько нанометров), каждый ион "выбивает" из мембраны примерно один атом. Этот подход позволяет создавать в ультратонких мембранах (толщиной менее 100 нм) отверстия диаметром до нескольких нанометров [10]. Использование ионов с энергиями более 100 кэВ позволяет создавать нанотверстия в пленках толщиной до нескольких десятков микрон. В этом случае мембрана помещается на пути пучка ионов. Ионы пучка имеют энергию, достаточную для прохождения мембраны, и оставляют на своем пути "след", образованный изменением связей между ядрами молекул материала мембраны. Применение последующего химически селективного травления позволяет получать сквозные отверстия диаметром в диапазоне 10 нм–10 мкм [11].

Отдельной проблемой является измерение параметров таких нанотверстий: диаметра и формы образованного отверстием канала. Использование для этого возможностей атомно-силового микроскопа (АСМ) сильно ограничено:

- в мембранах большой толщины длина канала, образованного нанотверстием, оказывается существенно больше рабочей длины зонда АСМ;
- ультратонкие мембраны разрушаются в процессе проведения измерений с АСМ.

Использование широко распространенных растровых электронных микроскопов (РЭМ) с термоэмиссионным катодом также имеет ряд ограничений:

- невысокое пространственное разрешение микроскопа (которое, как правило, ограничено значением 30–50 нм);
- низкий контраст изображения нанотверстий (обусловленный сравнимыми значениями тол-

щины мембраны и длины свободного пролета электрона в материале мембраны).

Важно также отметить необходимость измерения параметров создаваемых нанотверстий в процессе их производства, так как в этом случае уменьшается число последующих операций, проводимых с мембранами, каждая из которых, в свою очередь, может привести к изменению параметров нанотверстий. Все это ограничивает возможности микроскопии нанотверстий высокоточными методами, такими как, например, просвечивающая электронная микроскопия.

В данной работе рассмотрен другой подход к измерению параметров нанотверстий РЭМ, позволяющий уточнить полученные результаты и оценить их достоверность. Метод основан на дополнении изображения нанотверстий в РЭМ данными, полученными в результате компьютерной симуляции процесса взаимодействия острого фокусированного пучка электронов РЭМ с измеряемым образцом. Показана возможность характеристики параметров создаваемых нанотверстий, имеющих диаметр около 25 нм.

Метод микроскопии, в котором данные измерений, полученные растровым электронным микроскопом, дополняются результатами компьютерного моделирования процесса формирования изображения в РЭМ, получил название "*виртуальный растровый электронный микроскоп*" и впервые был предложен в работе [12]. В данном методе при компьютерном моделировании процесса взаимодействия пучка электронов РЭМ с образцом используется имеющаяся предварительная информация об измеряемом объекте: материале объекта, способе его изготовления. На основании этих данных создается набор параметров модели исследуемого объекта: форма, характерные размеры. Для каждого набора параметров объекта моделируется его изображение, которое затем сравнивается с изображением, полученным в "реальном" РЭМ. Получаемые зависимости между параметрами модели объекта и параметрами его изображения в микроскопе позволяют в ряде случаев существенно уменьшить дисперсию допустимых параметров измеряемого объекта, что приводит к эффективному увеличению разрешения РЭМ и возможности оценки погрешности проводимых измерений [13, 14].

В качестве объекта в данной работе исследовались нанотверстия диаметром от 20 до 300 нм, изготовленные в ультратонких мембранах нитрида кремния толщиной 40 нм острого фокусированным ионным пучком. Изготовление нанотверстий и их микроскопия проводились с помощью приборного комплекса Quanta 3D Dual Beam (FEI Co.), сочетающего в себе РЭМ и управляемый сфокусированный ионный пучок. Изображения нанотверстий, полученные этим микроскопом, использовались для предварительного определения параметров нанотверстий методом на основе "виртуального растрового электронного микроскопа".

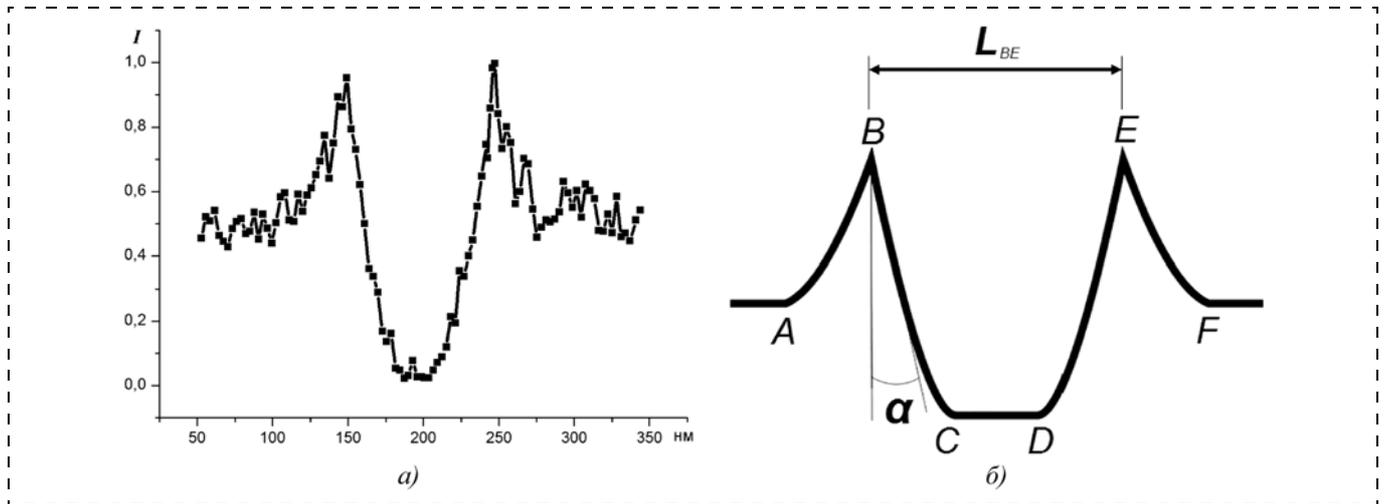


Рис. 2. Зависимость сигнала РЭМ при сканировании электронного луча вдоль диаметра нанотверстия:

*a* — экспериментально полученная зависимость, где  $I$  — нормализованная интенсивность видеосигнала; *б* — параметризованный вид экспериментальной кривой

Моделирование работы РЭМ было осуществлено на основе метода Монте-Карло расчета процессов взаимодействия электронного луча микроскопа с исследуемым образцом [12]. Одним из критических параметров в данном моделировании является форма пространственного распределения электронов в пучке РЭМ. Для определения диаметра электронного луча микроскопа проводилась серия калибровочных измерений РЭМ с помощью калибровочной меры МШПС-2.0К [15] по методике калибровки, установленной ГОСТ Р 8.636—2007. При силе тока электронов, равной 60 пА, измеренный диаметр пучка оказался равным 20 нм. Это значение использовалось в дальнейшем при проведении компьютерного моделирования.

На рис. 2, *a* представлена зависимость сигнала измеряемого РЭМ при сканировании его электронного луча вдоль диаметра одного из нанотверстий при следующих параметрах микроскопа: ускоряющее напряжение равно 30 кВ, ток — 62 пА. Как видно на рисунке, измеряемый сигнал состоит из участков, соответствующих эмиссии электронов плоской поверхностью мембраны (участки постоянного сигнала), и участков, соответствующих эмиссии нанотверстия в мембране: резкий скачок сигнала в районе края нанотверстия и уменьшение сигнала в его центре. Таким образом, представленная кривая отражает измеряемое РЭМ сечение канала, образованного нанотверстием в ультратонкой мембране. Для проведения анализа приведенного сигнала разобьем его на характерные участки, состоящие из кривых линий, четыре из которых (*AB*, *BC*, *DE*, *EF*) можно описать полиномами третьего порядка (рис. 2, *б*). При сравнении результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными будут использоваться следующие параметры: расстояние  $L_{BE}$  между максимумами сигналов, получаемых от боковых стенок нанотверстия (расстояние между точка-

ми *B* и *E*), и угол  $\alpha$  наклона изображения стенки, образованного нанотверстием канала (рис. 2, *б*).

Для проведения моделирования процесса построения изображения в РЭМ необходимо задать параметры измеряемого нанотверстия. В зависимости от условий создания нанотверстия (значения параметров сфокусированного ионного пучка; материал, проводимость и температура мембраны) возможно изготовление нанотверстий следующей геометрии:

- сквозной канал с цилиндрическими стенками;
- сквозной конусообразный канал;
- канал сложной формы.

На рис. 3 для каждой из приведенных форм канала представлен соответствующий профиль компьютерного моделирования сигнала РЭМ.

Как видно на рис. 3, наиболее близкую форму сигнала к полученному в эксперименте (см. рис. 2, *a*) имеет зависимость, представленная на рис. 3, *д*, соответствующая нанотверстию со сквозным конусообразным каналом (рис. 3, *б*). Эта модель геометрии канала, образованного нанотверстием в мембране, была использована в дальнейших расчетах. При этом характеристика параметров модели нанотверстия сводится к определению диаметров  $d_a$  и  $d_b$  образованного им канала.

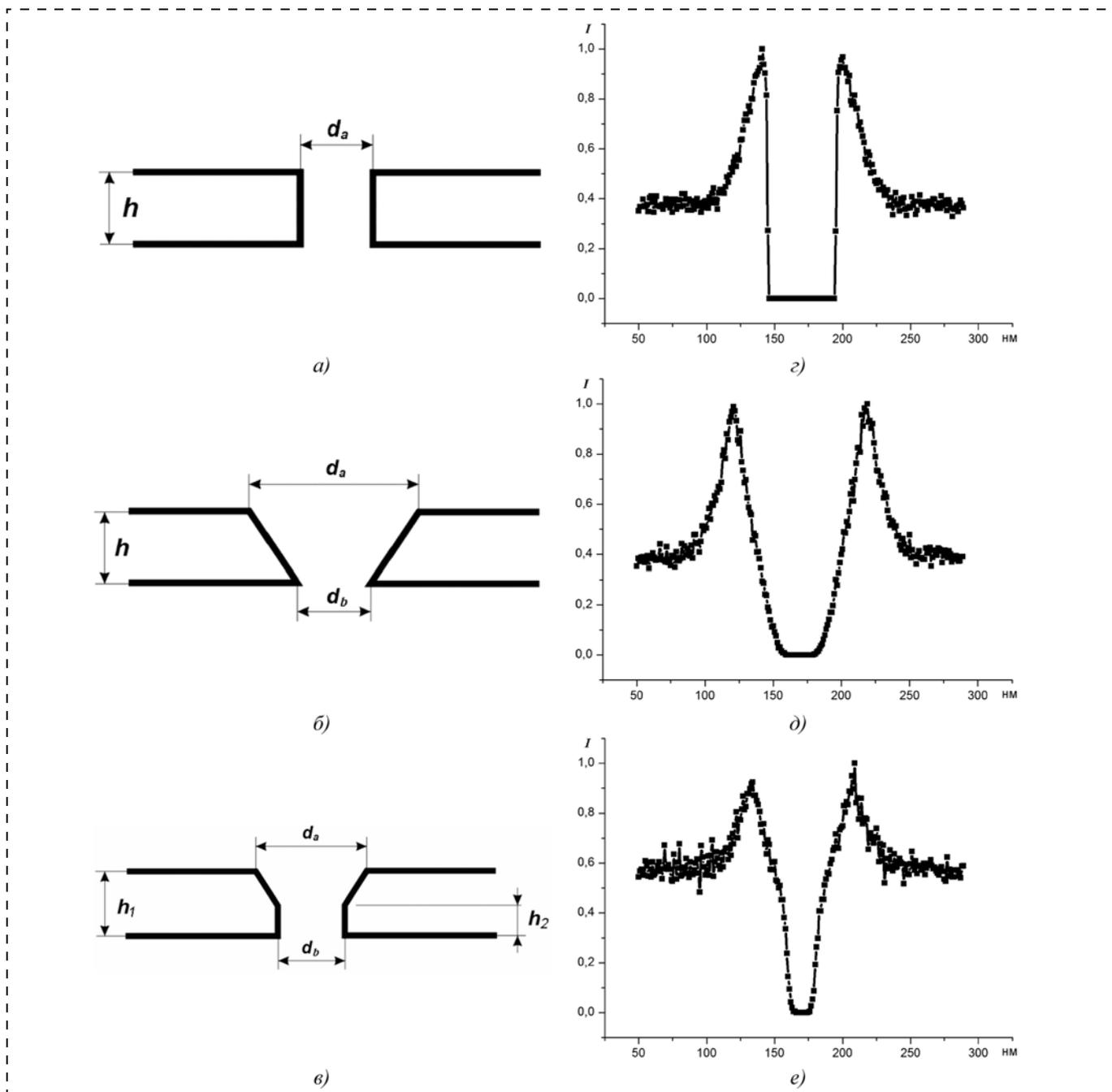
Параметры  $d_a$  и  $d_b$  нанотверстия были определены в серии расчетов, состоящих из компьютерного моделирования сигнала РЭМ для нанотверстий с различными значениями параметров  $d_a$  и  $d_b$ . Для каждого значения этих параметров моделировалось соответствующее изображение РЭМ, по которому измерялись следующие характерные параметры изображения: расстояние  $L_{BE}$  и угол  $\alpha$  (см. рис. 2, *б* и 3, *д*). Полученные результаты приведены на рис. 4.

На рис. 4, *a* показаны зависимости значения параметра  $L_{BE}$  от значения параметра нанотверстия  $d_a$  в диапазоне его значений от 40 нм до 110 нм при трех значениях параметра  $d_b$ :  $d_b^{(1)} = 20$  нм,  $d_b^{(2)} = 30$  нм и

$d_b^{(3)} = 40$  нм. На рисунке видно, что влияние параметра  $d_b$  нанотверстия на параметр  $L_{BE}$  невелико, в то время как зависимость значения параметра  $L_{BE}$  от параметра  $d_a$  имеет линейный характер. Последнее обстоятельство позволяет по экспериментально измеренному значению параметра  $L_{BE} = 98$  нм (см. рис. 2, а) определить значение параметра нанотверстия  $d_a$  равное  $95 \pm 3$  нм.

На рис. 4, б представлены результаты компьютерного моделирования зависимости параметра изо-

бражения нанотверстия  $\text{ctg} \alpha$  (см. рис. 2, б) от разности диаметров образованного им конусообразного канала  $d_a$  и  $d_b$  при пяти различных значениях параметра  $d_a$ :  $d_a^{(1)} = 95$  нм,  $d_a^{(2)} = 80$  нм,  $d_a^{(3)} = 110$  нм,  $d_a^{(4)} = 70$  нм и  $d_a^{(5)} = 130$  нм. Как видно на рисунке значение параметра нанотверстия  $d_a$  сильно влияет на получаемые зависимости  $\text{ctg} \alpha$  от разности  $(d_a - d_b)$ . Для экспериментально измеренной величины  $\text{ctg} \alpha = 0,035$  и определенного из рис. 4, а значения пара-

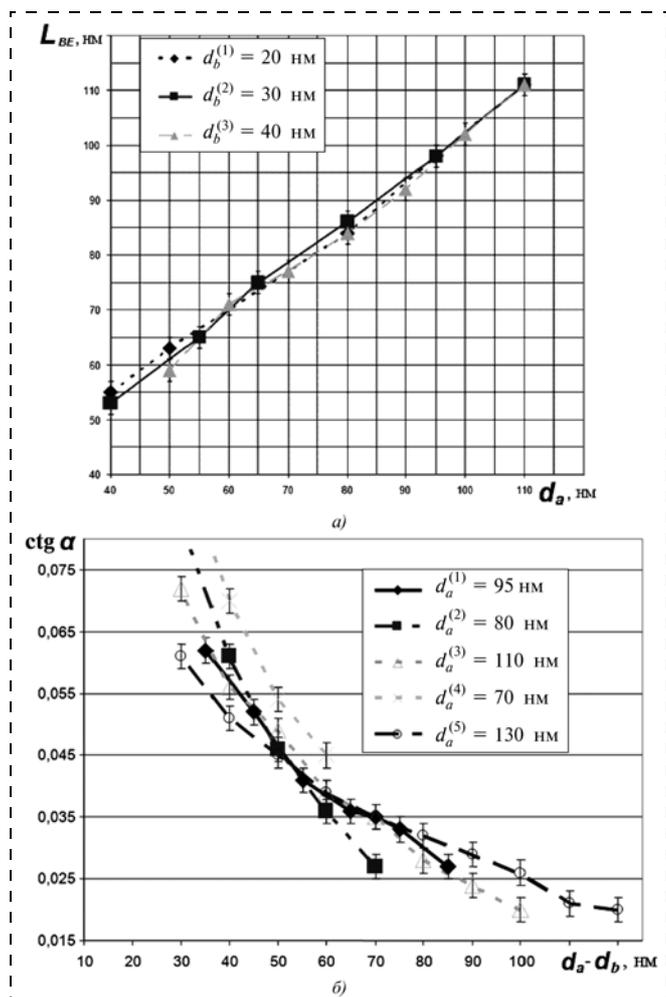


**Рис. 3. Возможные варианты формы канала, образованного нанотверстием в ультратонкой мембране:**

а — цилиндрический канал; б — конусообразный канал; в — канал сложной формы. Соответствующие результаты компьютерного моделирования изображения сечения каналов приведенных форм в РЭМ: з — цилиндрический канал; д — конусообразный канал; е — канал сложной формы, где по оси ординат отложено значение нормализованной интенсивности видеосигнала  $I$

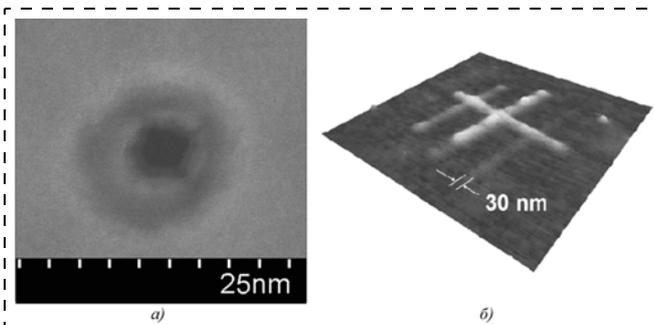
метра  $d_a = 95 \pm 3$  нм из рис. графика 4,  $b$  следует значение для параметра  $d_b$ , равное  $25 \pm 4$  нм. Погрешность проведенных измерений складывается из неопределенности измерения параметров  $L_{BE}$  и  $\alpha$  по экспериментальному изображению, а также погрешности значений параметров электронного пучка и погрешности определения параметра нанодоверстия в мембране по параметрам изображения этого нанодоверстия. Подробно влияние этих параметров на точность проведенных измерений исследовано в работе [12].

Достоверность полученных результатов была проверена в отдельном эксперименте по микроскопии мембран с нанодоверстиями с помощью РЭМ высокого разрешения. На рис. 5,  $a$  представлено изображение нанодоверстия, исследованного с по-



**Рис. 4. Зависимость параметров изображения РЭМ, полученных в результате компьютерного моделирования при различных значениях параметров нанодоверстия:**

$a$  — зависимость параметра  $L_{BE}$  от значения параметра нанодоверстия  $d_a$  в диапазоне значений от 40 нм до 110 нм при трех значениях параметра  $d_b$ :  $d_b^{(1)} = 20$  нм,  $d_b^{(2)} = 30$  нм и  $d_b^{(3)} = 40$  нм;  $b$  — зависимость параметра изображения нанодоверстия  $ctg \alpha$  от разности диаметров образованного им конусообразного канала  $d_a$  и  $d_b$  при пяти различных значениях параметра  $d_a$ :  $d_a^{(1)} = 95$  нм,  $d_a^{(2)} = 80$  нм,  $d_a^{(3)} = 110$  нм,  $d_a^{(4)} = 70$  нм и  $d_a^{(5)} = 130$  нм



**Рис. 5. Создание атомной наноструктуры с размером минимального элемента, равным 30 нм:**

$a$  — изображение использованного для атомной литографии нанодоверстия, полученное с помощью РЭМ высокого разрешения;  $b$  — наноструктура, образованная атомами In методом литографии с помощью атомной камеры-обскуры

мощью РЭМ Hitachi FE S-4800, диаметр сфокусированного электронного пучка которого составляет менее 1 нм. Как видно на рисунке, результаты микроскопии высокого разрешения хорошо согласуются с данными микроскопии с использованием "виртуального РЭМ". На рис. 5,  $b$  показана наноструктура, созданная из атомов In методом на основе атомной камеры-обскуры с помощью нанодоверстия, изображенного на рис. 5,  $a$ . Наноструктура представляет собой полосы разной толщины. Минимальный размер элемента созданной наноструктуры равен 30 нм. Проведенные расчеты показывают, что наноструктура с такими пространственными размерами была создана при использовании отверстия диаметром около  $24 \pm 5$  нм, что также хорошо согласуется с полученными с помощью "виртуального РЭМ" данными.

Полученные результаты демонстрируют, что дополнение информации, содержащейся в изображении нанодоверстий в тонких мембранах, получаемых с помощью РЭМ, результатами компьютерного моделирования физического процесса формирования этого изображения позволяет увеличить пространственное разрешение РЭМ и оценить уровень погрешности проводимых измерений. Такой подход позволяет исключить в процессе производства нанодоверстий использование дорогих микроскопов высокого разрешения. Кроме этого становится возможным контролировать параметры нанодоверстий в процессе их создания при использовании стандартных РЭМ, встроенных в установку со сфокусированным ионным пучком.

*Авторы выражают благодарность Федеральному агентству по науке и инновациям (государственные контракты номер 02.513.11.3224, 02.552.11.7033 в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2012 годы") и Федеральному агентству по техническому регулированию и метрологии (государственный контракт № 154-6/259) за финансирование проводимых исследований. В работе использовалось оборудование ЦКП МФТИ, ЦКП НИЦПВ и Института спектроскопии РАН.*

## Список литературы

1. **Bucknall D. G.** Nanolithography and patterning techniques in microelectronics // Woodhead Publishing Limited, Cambridge. 2005.
2. **Terris B. D., Thomson T.** Nanofabricated and self-assembled magnetic structures as data storage media // Jour. Phys. D: Appl. Phys. 2005. 38. R199.
3. **Arcamone J., M. A. F. van den Boogaart, Serra-Graells F.** et al. Full-Wafer Fabrication by Nanostencil Lithography of Micro-nanomechanical Mass Sensors Monolithically Integrated with CMOS // Nanotechnology. 2008. 19.
4. **Eigler D. M. and Schweizer E. K.** Positioning Single Atoms With a Scanning Tunneling Microscope // Nature. 1990. 344. 524.
5. **Meystre P.** Atom Optics. Berlin: Springer-Verlag, 2001.
6. **Balykin V. I., Letokhov V. S.** Atom Optics with Laser Light // Harwood Acad. Publ., Chur. 1995.
7. **Bradley C. C., Anderson W. R., McClelland J. J., Cella R. J.** Nanofabrication via atom optics // Appl. Surf. Sci. 1999. V. 141. P. 210—218.
8. **Balykin V. I., Borisov P. A., Letokhov V. S.** et al. Atom "Pinhole Camera" with Nanometer Resolution // JETP Letters. 2006. V. 84. N 8. P. 466—469.
9. **Melentiev P. N., Zablotskiy A. V., Lapshin D. A.** et al. Nanolithography based on an atom pinhole camera // Nanotechnology. 2009. V. 20. N 23.
10. **Li J., Stein D., McMullan C.** et al. Ion-beam sculpting at nanometer length scales // Lett. Nature. 412. 2001. P. 166—169.
11. **Apel P. Yu., Blonskaya I. V., Orelovitch O. L.** et al. Effect of nanosized surfactant molecules on the etching of ion tracks: new degrees of freedom in design of pore shape // Nucl. Instrum. Meth. B209. 2003. P. 329—334.
12. **Заблоцкий А. В., Батурич А. С., Бормашов В. С.** и др. Компьютерное моделирование растрового электронного микроскопа для целей нанометрологии // Российские нанотехнологии. Т. 2. № 11—12. 2007. С. 40.
13. **Bormashov V. S., Zablotskiy A. V., Baturin A. S.** Concept of "Virtual Microscope" for nanometrology // Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology VIII. Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences. V. 78. 2009. P. 234—237.
14. **Заблоцкий А. В., Батурич А. С., Шешин Е. П.** и др. Компьютерное моделирование средств измерений в нанометрологии // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 8. С. 2—6.
15. **Новиков Ю. А., Озерин Ю. В., Тодуа П. А.** и др. Линейная мера микрометрового и нанометрового диапазона для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии // Тр. Института общей физики им. А. М. Прохорова. 2006. № 62. С. 36.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 620.1.08-53.08

**В. А. Акопьян**, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., НИИ механики и прикладной математики им. И. И. Воровича ЮФУ, e-mail: akop@math.rsu.ru,  
**А. А. Панич**, канд. техн. наук, нач. лаб., НКТБ "Пьезоприбор" ЮФУ, e-mail: rctt@rctt.ru,  
**Е. В. Рожков**, науч. сотр., НИИ механики и прикладной математики им. И. И. Воровича ЮФУ,  
**С. Н. Шевцов**, д-р техн. наук, зав. отделом, Южный научный центр РАН, e-mail: aerondstu@list.ru

## ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Приведены схема и конструкция измерительно-информационного комплекса для моделирования процессов активного управления и демпфирования колебаний элементов летательных аппаратов в целях выбора оптимальных параметров управления колебаниями. Исследованы некоторые характеристики процесса демпфирования колебаний уменьшенной модели лопасти вертолета Ми-2А.*

**Ключевые слова:** измерительно-информационный комплекс, МЭМС, моделирование, колебания, демпфирование, пьезоэлектрические актюаторы, сенсоры.

Решению фундаментальной проблемы подавления вибраций и шума летательных аппаратов (ЛА) в последние годы уделяется все больше внимания. Теоретические исследования в этой области ведутся давно и достаточно успешно. В отличие от этого прикладные работы были сосредоточены на решении, безусловно, крупных задач, связанных с потерей устойчивости ЛА при переходе через звуковой барьер, а также проблемами входа в штопор, бафтинг хвостового оперения, "шимми" носового колеса ЛА и другими подобными явлениями. Эти задачи были в основном решены на основе применения электромеханических и электрогидропневматических систем. Однако инерционность исполнительных силовых элементов таких систем все чаще не удовлетворяет требованиям новых типов ЛА. Один из подходов к решению этих новых задач заключается в разработке микроэлектромеханических систем (МЭМС), среди которых важное место занимают МЭМС с использованием пьезоактюаторов и пьезосенсоров. Физические основы и анализ областей применения таких систем достаточно полно описан в монографии А. Е. Панича и С. Н. Жукова [1]. Некоторые теоретические аспекты поведения элементов электромеханических преобразовате-

лей МЭМС приведены в ряде других работ, в том числе в обзоре [2].

Задачи, связанные с разработкой МЭМС на основе пьезопреобразователей, достаточно давно решаются в Центре LaRC NASA, Мерилендском университете, в фирмах Boeing и MIT в рамках программ SMART и SAMPSON [3,4]. Исследования деформационных характеристик металлических и композитных пластин с наклеенными или напыленными на них пьезосенсорами и актюаторами проводятся достаточно давно [5–10].

В этих работах приведены результаты исследований влияния числа актюаторов и их местоположения на консольной пластине на прогиб, связанный с жесткостью подложки, а также некоторые подходы к решению задач активного управления колебаниями пластин и консольных балок. Основной акцент в них сделан на рассмотрение деформационного поведения простых моделей тонких пластин или балочек с пьезоактюаторным управлением, обеспечивающим гашение колебаний. Однако задачи, посвященные исследованию деформационного поведения и управления колебаниями более сложных реальных элементов конструкций, типа моделей лопастей вертолетов, рассмотрены в редких работах, касающихся, например, роботов-манипуляторов [11]. Здесь необходимо отметить, что известны работы отечественных авторов, в которых ряд задач, посвященных, например, пьезоактюаторному управлению оптических космических зеркал, были успешно решены [12, 13], хотя ссылок на них, как и на другие подобные работы в приведенных выше статьях и обзорах, практически нет. Одновременно с этим исследований МЭМС, связанных с демпфированием колебаний других, более крупных конструкций, в частности, узлов и элементов ЛА, явно недостаточно. Среди них можно отметить работу, посвященную идентификации и управлению несущей конструкцией лопасти вертолета на основе сетевого подхода [14], а также анализ моделирования процессов активного демпфирования колебаний пластинчатой модели лопасти вертолета [15]. Особенности, возникающие при рассмотрении

устойчивости систем пьезоактюаторного управления, подробно описаны в работе [16]. Из работ, посвященных решению такого рода задач, совсем мало публикаций с описанием испытательных стендов и комплексов для моделирования процессов гашения колебаний элементов ЛА [4, 15], хотя актуальность решения таких задач несомненна.

Настоящая статья посвящена описанию измерительно-информационного комплекса для моделирования процессов демпфирования колебаний достаточно сложного элемента ЛА — модели лопасти вертолета, а также результатам пробных испытаний комплекса, раскрывающих его функциональные возможности.

### Измерительно-информационный комплекс ЛВ-001

Комплекс предназначен для моделирования процессов демпфирования и активного управления колебаниями моделей элементов ЛА, в том числе уменьшенной лопасти с адаптивным управлением колебаниями. Структурная схема комплекса представлена на рис. 1.

Комплекс состоит из двух модулей: нагружающего и аппаратно-регистрирующего. Нагружаю-

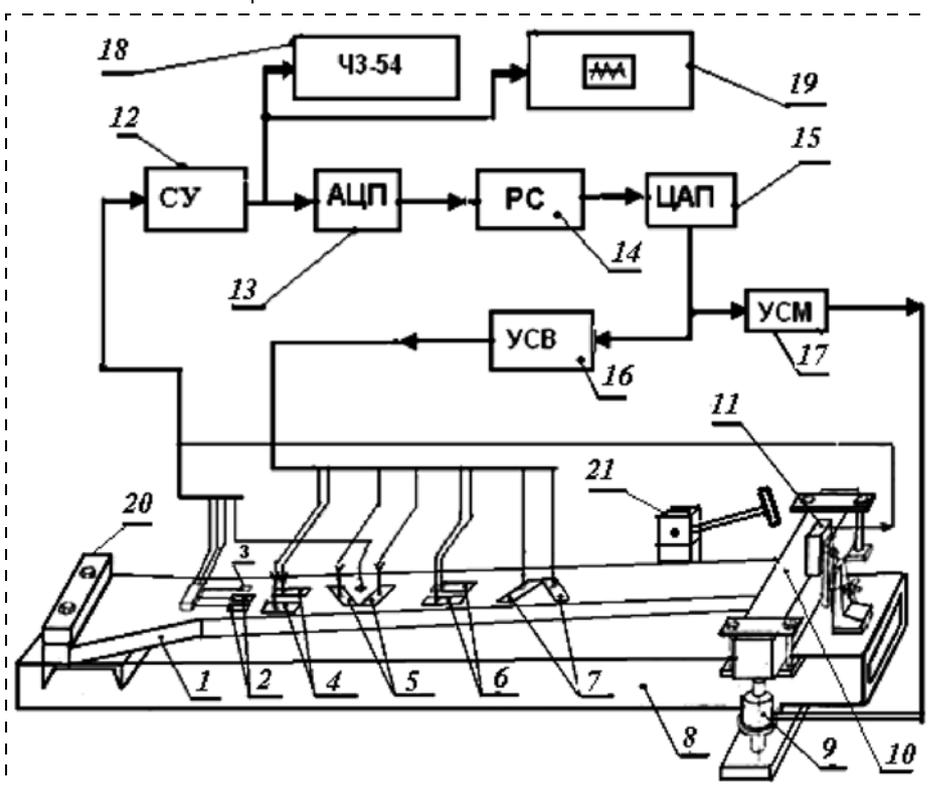


Рис. 1. Структурная схема комплекса для моделирования колебаний лопасти ЛВ-001:

1 — объект исследования; 2 — тензометрические мосты изгибных колебаний; 3 — пьезоэлектрический сенсор изгибных колебаний; 4 — пьезоэлектрические актюаторы изгибных колебаний 1-й моды; 5 — пьезоэлектрические актюаторы кругильных колебаний 1-й моды; 6 — пьезоэлектрические актюаторы изгибных колебаний 3-й моды; 7 — пьезоэлектрические актюаторы кругильных колебаний 3-й моды; 8 — основание блока нагружения; 9 — электромагнитный возбудитель колебаний; 10 — присоединенная масса; 11 — оптический датчик перемещений РФ-603; 12 — согласующее устройство (СУ); 13 — аналогово-цифровой преобразователь (АЦП); 14 — персональный компьютер (РС); 15 — цифроаналоговый преобразователь (ЦАП); 16 — многоканальные усилители высокого напряжения (УСВ); 17 — усилитель мощности (УСМ); 18 — частотомер; 19 — цифровой осциллограф; 20 — кронштейн-держатель испытуемого объекта; 21 — ударный механизм

щий модуль с установленной в нем испытуемой моделью лопасти вертолета (на модели наклеены тензометрические и пьезоэлектрические сенсоры деформаций и смещений, а также пьезоэлектрические актюаторы) предназначен для возбуждения в модели собственных и вынужденных колебаний. Аппаратурно-регистрирующий модуль содержит тензометрический, пьезоэлектрический и оптический приемные тракты, согласующие устройства (блоки формирователей — масштабирующих усилителей, разъемных частей), специализированное устройство АЦП/ЦАП, в котором принятые сигналы оцифровываются и передаются в буфер данных компьютера и далее с помощью прикладной программы подвергаются дальнейшей обработке по прилагаемым алгоритмам.

Нагружающий модуль представляет собой металлическую конструкцию, собранную на массивном основании, на одном из концов которого жестко закреплен кронштейн — держатель испытуемой модели лопасти 1. До установки этой модели в нагружающий модуль на верхней и нижней поверхностях лопасти наклеиваются тензометрические мосты изгибных колебаний 2, пьезоэлектрический сенсор деформаций (при изгибных колебаниях) 3, пьезоэлектрические актюаторы изгибных 4 и крутильных 5 колебаний (для возбуждения 1-й моды колебаний), актюаторы изгибных колебаний 6 (для возбуждения 3-й моды колебаний), актюаторы 3-й моды крутильных колебаний 7. На кронштейне массивного основания 8 установлены два электромагнитных возбудителя изгибных и крутильных колебаний 9. Вынужденные колебания испытуемой модели, генерируемые возбудителями 9, передаются на нее через хомуты присоединенной массы 10, закрепленной на свободном конце испытуемой модели. Присоединенная масса была установлена для согласования частотных спектров уменьшенной и реальной модели лопасти. Свободные колебания в модели возбуждаются с помощью ударного механизма 21, закрепленного около кронштейна-держателя. На основании нагружающего модуля у торца модели установлен оптический датчик 11 поперечных перемещений свободного конца модели.

Аппаратурно-регистрирующий модуль комплекса содержит согласующее устройство 12, аналогово-цифровой преобразователь 13, персональный компьютер 14, цифроаналоговый преобразователь 15, блок многоканальных усилителей высокого напряжения 16, усилитель мощности 17, питающий возбудитель колебаний 9, частотомер 18 и цифровой осциллограф 19. Испытуемая модель лопасти 1 жестко (консольно) закрепляется

в кронштейне-держателе 20, смонтированном на основании 8 нагружаемого модуля. Ударный механизм 21 установлен на основании 8 комплекса.

В аппаратурно-регистрирующем модуле комплекса измерение перемещений свободного конца модели и калибровка сенсоров осуществлялись оптическим измерителем типа РФ-600 фирмы РИФТЭК (Беларусь).

Тензодатчики деформаций 2 и пьезоэлектрические сенсоры 3 передают сигналы, пропорциональные локальным деформациям лопасти, на многоканальный аналогово-цифровой — цифроаналоговый преобразователь Numsoft MF-624/ (в схеме АЦП и ЦАП условно разделены). С выхода ЦАП сигналы системы распределенного управления усиливаются усилителями (типа АРЕХ РЕ-89, РЕ-91) и поступают на входы актюаторов 4, 5, 6, 7, которые возбуждают колебания лопасти в режиме демпфирования ее вынужденных колебаний.

Для получения сигналов от сенсоров используются буферизованные аналоговые порты, причем частота дискретизации сигнала (14 бит) ограничена пределом 250 кГц и производительностью вычислительной системы, которая программно осуществляет фильтрацию и формирует выходной векторный аналоговый сигнал управления.

Для регистрации, обработки и хранения сигналов использовались цифровой осциллограф Wave Surfer 422 фирмы Le Crou 19 и частотомер ЧЗ-54. Обработка сигналов осуществлялась с помощью программного обеспечения в среде MatLab и в редакторе PowerGraph. Общий вид комплекса ЛВ-001 приведен на фотографии (рис. 2).

Принцип действия комплекса поясняется структурной схемой (см. рис. 1) и работой отдельных его частей, описанных в их технических описаниях.



Рис. 2. Общий вид комплекса ЛВ-001

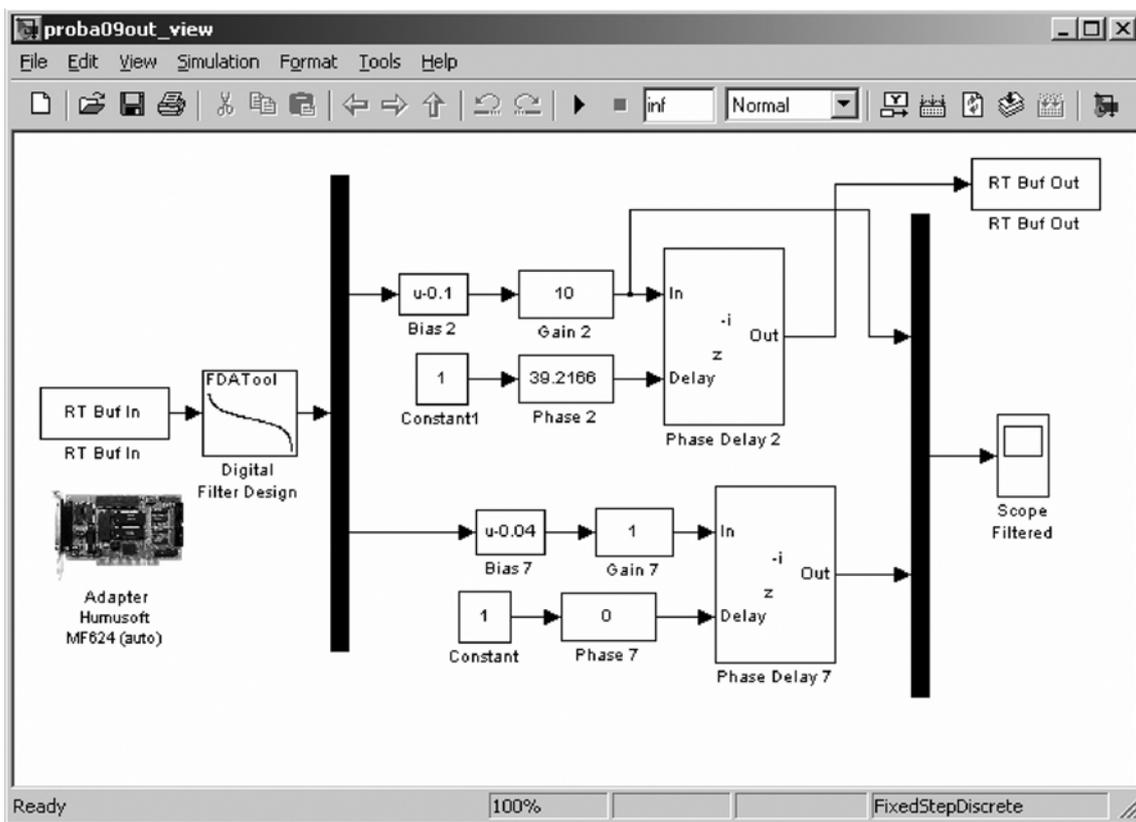


Рис. 3. Блок-схема измерительной части комплекса в модуле Simulink

### Функциональные возможности комплекса ЛВ-001

Измерительно-информационный комплекс, структурная схема которого описана выше, предназначен для решения ряда исследовательских задач, связанных с моделированием колебательных процессов в моделях элементов ЛА (например, лопастей вертолетов) и демпфированием колебаний с помощью встроенных пьезоэлектрических актюаторов и последующим определением оптимальных параметров процесса демпфирования. При решении конкретной задачи используется один из модулей Simulink в среде программного обеспечения MatLab, дополненного программным интерфейсом Real Time Toolbox, под управлением которого работает плата MF-624.

В частности, для проведения отладки программного обеспечения и комплекса в целом была использована блок-схема модуля Simulink (рис. 3), разработанная С. Брагиным.

### Пробные испытания комплекса

После доводки конструкции комплекса и отладки программного обеспечения были проведены исследования по моделированию собственных и вынужденных колебаний уменьшенной модели лопасти вертолета и их демпфированию с помощью актюаторов.

На первом этапе были исследованы параметры свободных колебаний модели при ударном нагружении, а на втором — вынужденных колебаний модели при их гармоническом возбуждении электромагнитным возбудителем колебаний. В случае нагружения одиночным ударом было исследовано влияние электрического напряжения на усилителе измерительного канала на степень демпфирования свободных затухающих колебаний. Напряжение менялось дискретно и было равно  $200 \times 2$ ,  $250 \times 2$ ,  $300 \times 2$  В.

Методика исследований демпфирования колебаний при ударном нагружении заключалась в следующем. В соответствии с инструкцией по эксплуатации комплекса вначале запускается аппаратно-регистрирующий модуль комплекса. После выхода параметров комплекса на рабочий режим с помощью ударного механизма 21 (см. рис. 1) осуществляется одиночный удар по лопасти в зоне присоединенной массы 10. Вначале на усилитель 16 подается напряжение  $220 \times 2$  В, выходы которого соединены со входом актюаторов 4, 5, 6, 7. Актюаторы возбуждают колебания в лопасти, демпфирующие свободные колебания лопасти. Обратная связь осуществляется передачей выходных сигналов с сенсора 3 (или тензомостов 2) на согласующее устройство 12 и далее на АЦП и компьютер 14. Сопря-

женные осциллограммы свободных колебаний испытуемой модели, демпфированных двумя актюаторами 4 при напряжении на усилителе (поз. 16)  $200 \times 2$  В, приведены на рис. 4. Осциллограмма, нанесенная точками, отображает сигнал с выхода пьезоэлектрического сенсора изгибных колебаний, а сплошной линией — с выхода высоковольтного усилителя (УСВ).

На графике сигнала с выхода пьезосенсора видно, что амплитуда свободных колебаний в течение 10 с уменьшилась по экспоненте с  $\sim 5$  В до 0,05 В. В момент начала демпфирования сигнал с усилителя, равный вначале нулю, после небольшого переходного процесса (0,5 с) достигает максимального значения ( $\sim 2$  В) и затем по экспоненте спадает.

В соответствии с программой испытаний, на второй стадии на усилитель подавались следующие значения напряжений:  $250 \cdot 2$  В и  $300 \cdot 2$  В, и в результате были получены соответствующие осциллограммы задемпфированных колебаний модели. Характер этих графиков имеет тот же вид, что и изображенный на рис. 4, и отличается амплитудами сигналов и временем их демпфирования. Эти графики в статье не приведены.

На втором этапе программы испытаний исследовались процессы пьезоактюаторного демпфирования вынужденных колебаний модели лопасти вертолета при гармоническом возбуждении их электромагнитными возбудителями колебаний.

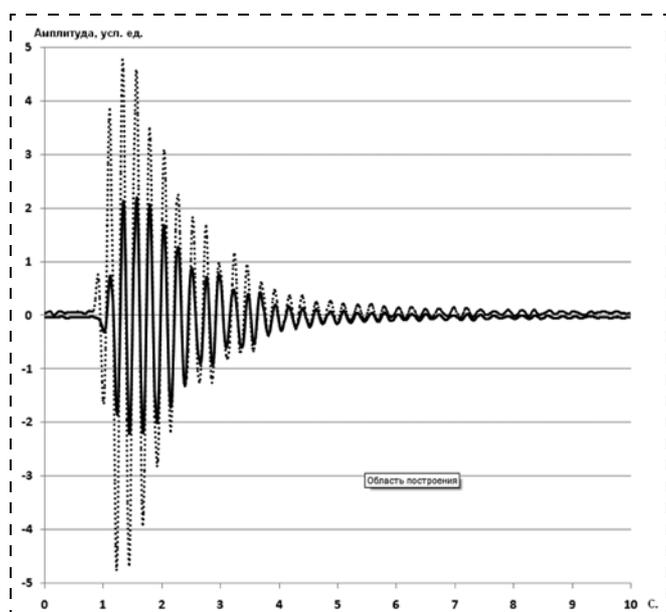


Рис. 4. Осциллограммы свободных демпфированных колебаний модели (напряжение на усилителе  $200 \times 2$  В, демпфирование одной парой пьезоактюаторов). Кривая, нанесенная точками, отображает сигнал с выхода пьезоэлектрического сенсора изгибных колебаний, а кривая в виде сплошной линии — сигнал с выхода высоковольтного усилителя

Методика эксперимента отличается от описанной выше только способом возбуждения колебаний. Демпфирование колебаний осуществлялось одной парой актюаторов первого измерительного канала последовательно при напряжении на усилителе, равном  $200 \times 2$ ,  $225 \times 2$ ,  $250 \times 2$ ,  $275 \times 2$  и  $300 \times 2$  В. Осциллограмма вынужденных демпфированных колебаний модели при напряжении на усилителе  $200 \times 2$  В для случая демпфирования одной парой пьезоактюаторов, приведена на рис. 5. На этом графике момент включения актюаторов, зарегистрированный на отметке 0,5 с, отображает начальный момент демпфирования колебаний, после чего амплитуда колебаний быстро и экспоненциально уменьшается. Осциллограммы колебаний при увеличении напряжения на усилителе до  $300 \times 2$  В (в статье не приведены) имеют такой же характер, как и на рис. 5. Отличие осциллограмм заключается в различной скорости уменьшения амплитуд вынужденных колебаний.

Далее в программе исследований была запланирована попытка увеличения скорости демпфирования вынужденных колебаний простейшим способом — посредством увеличения числа пьезоактюаторов, в частности, введением дополнительно еще одной пары пьезоактюаторов. Осциллограмма колебаний модели для этого случая (при напряжении на усилителе  $200 \times 2$  В) приведена на рис. 6. Здесь, так же как и в предыдущем случае, демпфирование начинается с отметки 0,5 с, в то время как скорость демпфирования существенно выше. Ос-

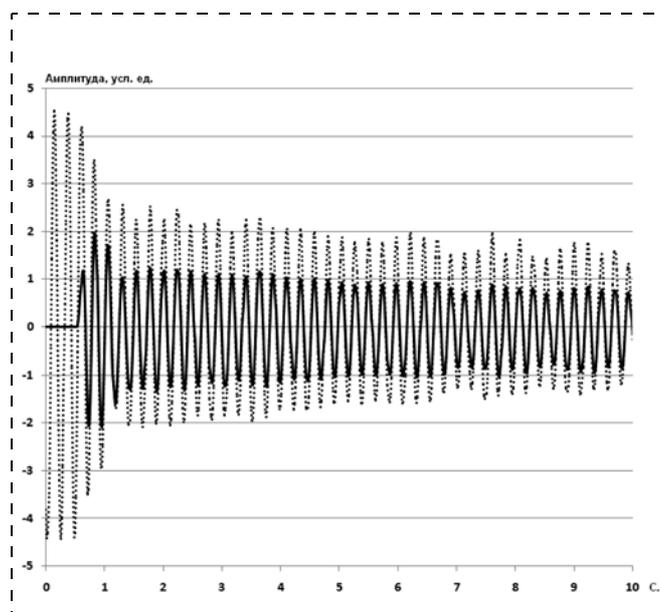


Рис. 5. Осциллограммы вынужденных колебаний модели (напряжение на усилителе  $200 \times 2$  В, демпфирование осуществляется одной парой актюаторов). Кривая, нанесенная точками, отображает сигнал с выхода пьезоэлектрического сенсора изгибных колебаний, а кривая в виде сплошной линии — с выхода высоковольтного усилителя УСВ

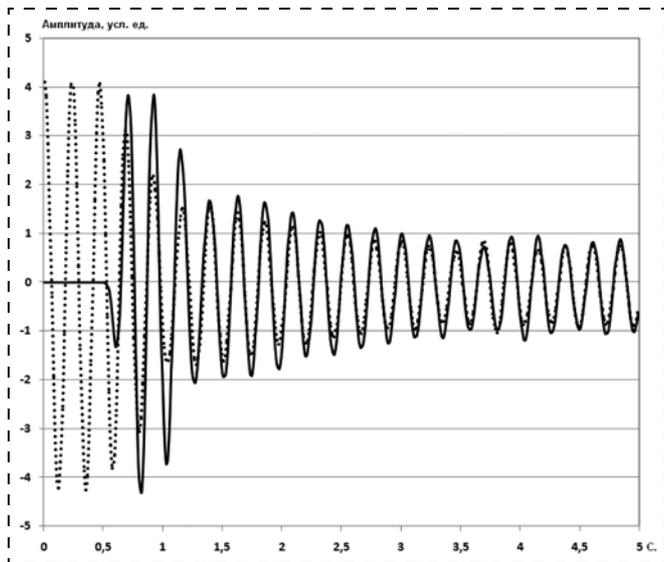


Рис. 6. Осциллограмма вынужденных колебаний модели (напряжение на усилителе  $200 \times 2$  В, демпфирование осуществляется с помощью двух пар актюаторов). Кривая, нанесенная точками, отображает сигнал с выхода пьезоэлектрического сенсора изгибных колебаний, а кривая в виде сплошной линии — с выхода высоковольтного усилителя УСВ

циллограммы колебаний при увеличении напряжения на усилителе имеют аналогичный характер, но скорость демпфирования при этом несколько возрастает. Сравнение осциллограмм, демпфированных с помощью двух и четырех актюаторов при одинаковом напряжении на усилителе  $200 \times 2$  В, приведенных на рис. 5 и 6 соответственно, показало, что за одинаковый интервал времени (5 с) амплитуда сигналов при включении четырех актюаторов уменьшилась с 4,5 до 1 В.

Анализ полученных осциллограмм показал, что степень и скорость демпфирования меняются при изменении напряжения на усилителе. Для того чтобы оценить влияние этого параметра на скорость демпфирования осциллограммы, был обработан (с помощью оригинального программного модуля MatCad, разработанного А. В. Черпаковым) и рассчитан логарифмический декремент затухания по известному соотношению [16]:

$$S = 1/m \ln(A_n/A_{n+m}),$$

где  $m$  — число колебаний во временном интервале демпфирования;  $A_n, A_{n+m}$  — начальная и конечная (в конце интервала демпфирования) амплитуды колебаний соответственно.

Полученные из расчета значения логарифмического декремента затухания при одиночном ударном и гармоническом возбуждениях колебаний приведены в табл. 1—3.

Анализ рассчитанных выше данных показал следующее. Степень демпфирования свободных колебаний модели одной парой пьезоактюаторов

Таблица 1

Возбуждение собственных колебаний при одиночном ударном нагружении (демпфирование по одному каналу управления одной парой пьезоактюаторов)

Напряжение на усилителе, В	Логарифмический декремент затухания $\delta$		
	Интервал демпфирования, с		
	0,5—1,5	1,5—3,0	3,0—4,5
$200 \times 2$	0,195	0,181	0,166
$250 \times 2$	0,015	0,121	0,193
$300 \times 2$	0,71	0,096	0,156
	0,123	0,108	0,151

Таблица 2

Гармоническое возбуждение колебаний (демпфирование по одному каналу управления одной парой пьезоактюаторов)

Напряжение на усилителе, В	Логарифмический декремент затухания $\delta$		
	Интервал демпфирования, с		
	0,5—1,5	1,5—3,0	3,0—4,5
$200 \times 2$	0,092	0,019	0,00324
$225 \times 2$	0,082	0,010	0,010
$250 \times 2$	0,069	0,011	0,035
$275 \times 2$	0,027	0,024	0,033
$300 \times 2$	0,024	0,034	0,034

Таблица 3

Гармоническое возбуждение колебаний (демпфирование по двум каналам управления четырьмя пьезоактюаторами)

Напряжение на усилителе, В	Логарифмический декремент затухания $\delta$		
	Интервал демпфирования, с		
	0,5—1,5	1,5—3,0	3,0—4,5
$200 \times 2$	0,253	0,096	0,017
$225 \times 2$	0,165	0,099	0,011
$250 \times 2$	0,084	0,174	0,055
$275 \times 2$	0,067	0,091	—
$300 \times 2$	0,089	0,177	—

при ударном нагружении в среднем несколько выше этого параметра колебаний при гармоническом возбуждении вынужденных колебаний (табл. 1 и 2). Это можно объяснить из физических соображений тем, что при вынужденных колебаниях происходит постоянная подкачка энергии в колебательный процесс, который отсутствует при свободных колебаниях, возбужденных в модели одиночным ударом.

Другой вывод, вытекающий из рассчитанных значений логарифмического декремента затуханий свободных колебаний (табл. 1), заключается в следующем. Уже при подаче от источника питания на усилитель электрического напряжения  $200 \times 2$  В можно достичь максимальной степени демпфиро-

вания колебаний модели. При напряжении питания усилителя, превышающем  $200 \times 2$  В, и входном напряжении порядка 4 В его выходное напряжение остается постоянным и равным около 100 В. Поэтому декремент затухания в этом случае практически не зависит от напряжения питания усилителя.

Из сравнения значений декрементов затухания, полученных при демпфировании вынужденных колебаний двумя и четырьмя актюаторами (табл. 2, 3), видно, что при удвоении числа актюаторов (на первом интервале демпфирования) имеет место увеличение декремента от 0,024—0,092 до 0,089—0,253, т. е. скорость демпфирования увеличилась более чем на порядок. Такой эффект был достигнут благодаря оптимальному расположению актюаторов на поверхности модели лопасти, полученной нами ранее из результатов конечно-элементарного моделирования колебаний модельного лонжерона с наклеенными на нем актюаторами [18].

## Выводы

Схема и конструкция описанного измерительно-информационного комплекса позволяет моделировать процессы активного управления и демпфирования колебаний моделей элементов летательных аппаратов и оптимизировать параметры системы управления для достижения эффективного демпфирования опасных колебаний некоторых типов ЛА, таких как, например, вертолеты.

Предложенная схема позволяет осуществлять обратную связь в системе активного управления на основе PD-регулятора с минимальным числом каналов управления. Существенным отличием описанного комплекса от аналогов является возможность реализации системы управления в реальном масштабе времени средствами среды SIMULINK MatLab, дополненного программным интерфейсом Real Time Toolbox.

В результате пробных исследований динамики процессов демпфирования колебаний активной уменьшенной модели рулевого винта вертолета Ми-2А удалось выявить ряд особенностей процесса демпфирования колебаний этой модели. В частности, при использовании предложенной схемы расположения двух пар пьезоактюаторов на испытываемой лопасти максимальная скорость демпфирования достигается уже при напряжении питания усилителя не более  $200 \times 2$  В. При необходимости дальнейшего увеличения скорости демпфирования в схеме комплекса могут быть применены другие типы усилителей. Это имеет важное значение для обеспечения длительной эксплуатации пьезоактюаторов системы управления.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 09-08-13503-офи\_и, 09-08-92005-ННСа, 07-01-00012).*

## Список литературы

1. **Панич А. Е., Жуков С. Н.** Пьезокерамические актюаторы // Пьезоэлектрическое приборостроение. Ростов-на-Дону: Изд-во ЦВВР, 2008. Т. 4. 159 с.
2. **Бабаевский П. Г., Резниченко Г. М., Жуков А. А., Жукова С. А., Гринькин Е. А.** Электромеханические преобразователи сенсорных микро- и наносистем: физические основы и масштабные эффекты. Ч. 1. Чувствительные механические элементы и актюаторы // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 11. С. 32—44.
3. **Onaies Z., Harrison S., and Silcox J.** Piezoelectric Materials for Sensor and Actuator // Applications at NASA LaRC. ICASE RQ. 1999. V. 8. N 2. P. 1.
4. **Asmarter** transition for smart technologies// Aerospace America. 2006. June. P. 18—21.
5. **Beckert W. and Pfindtner G.** Analysis of the deformational behaviour of a bimorph configuration with piezoelectric actuation // Smart Mater. Struct. 2002. V. 11. P. 599—609.
6. **Sneikh N. Ahmad, Upadhyay C. S. and Venkatesan C.** Linear and Nonlinear Analysis of a Smart Beam Using General Electrothermoelastic Formulation AIAA J. 2004. V. 42. N 4. P. 840—849.
7. **Li J., Sedaghati R., Dargahi J., Waechter D.** Design and development of a new piezoelectric linear Inchworm actuator // Mechatronics. 2005. N 15. P. 651—681.
8. **Raia S., Paskilkar A., Sreedeeep R., Kavesh J.** Flutter control of a composite plate with piezoelectric multilayered actuators // Aerospace Science and Technology. 2006. N 10. P. 435—441.
9. **Lin J.-C., Nien M. H.** Adaptive control of the composite cantilever beam with piezoelectric damping-modal // Composite Struct. 2005. N 70. P. 170—176.
10. **Nguyen Q., Tong L.** Shape control of smart composite plate with non-rectangular piezoelectric actuator // Composite Struct. 2004. N 66. P. 207—214.
11. **Sun D., Miils J. K., Shan J.** and al. A. PZT actuator control of a single — link flexible manipulator based on linear velocity feedback and actuator placement // Mechatronics. 2004. N 14. P. 381—401.
12. **Панич А. Е., Сокалло А. И., Гришин Е. А.** и др. Перспективные конструкции и технологии создания гибких зеркал для адаптивных оптических систем // Микросистемная техника, 2002. № 4. С. 60—64.
13. **Молодцов Г. А., Биткин В. Е., Симонов В. Ф.** и др. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композитных материалов. М.: Наука. 2002.
14. **Шевцов С. Н., Соловьев А. Н., Акопьян В. А.** и др. Идентификация и управление динамическим состоянием несущей композитной конструкции на основе нейросетевого подхода // Тр. VI Междунар. конф. "Идентификация систем и задачи управления" SICPRO. М.: 2007. С. 324—335.
15. **Акопьян В. А., Рожков Е. В., Соловьев А. Н.** и др. Методика и измерительный комплекс для моделирования процессов демпфирования колебаний элементов конструкций с помощью пьезоактюаторов // Нано- и микросистемная техника, 2007. № 10. С. 36—41.
16. **Афонин С. М.** Абсолютная устойчивость систем управления деформацией пьезоактюатора нано- и микроперемещений // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 11. С. 47—52.
17. **Бидерман В. Л.** Прикладная теория механических колебаний. М.: Высшая школа. 1972.
18. **Слюсарь Б. М., Панич А. Е., Шевцов С. Н., Акопьян В. А.** Уменьшенная модель активной лопасти вертолета. Динамическое подобие и система интеллектуального управления // Матер. междунар. научно-практической конф. "Современные технологии — ключевое звено в возрождении отечественного авиастроения". Т. 1. Казань. 2008. С. 170—176.

**А. В. Гуреев**, д-р техн. наук, доц.,  
Московский государственный институт  
электронной техники (технический университет),  
**С. Е. Воронин**, инженер, ООО "Юникор  
микросистемы", e-mail: newadep@mail.ru

## МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

*Предлагается управляемый генератор треугольных импульсов с обратной связью. Рассмотрена проблема шума такой системы, выполнен расчет средней спектральной плотности для треугольного сигнала и возникающего эквивалентного шума сигнала исходя из значений разности амплитуд, полученных в ходе моделирования генератора в САПР "Cadence".*

**Ключевые слова:** сверхширокополосный, треугольный импульс, передатчик, Гауссов (импульс).

Современное развитие микросистемной техники приводит к совершенствованию датчиков и систем на их основе. Миниатюризация и увеличение функциональности приводит к ужесточению требований к энергопотреблению, а также увеличению передаваемой информации. Это, в свою очередь, приводит к совершенствованию систем съема и обработки информации в части быстродействия и потребляемой мощности.

В настоящее время во всем мире наблюдается интерес к сверхширокополосным системам передачи информации. Переход к ним позволяет создавать более компактные, менее энергоемкие беспроводные сети. Технология беспроводной передачи информации, использующая сверхкороткие импульсы с большой относительной полосой частот (более 25 %) позволяет при низкой мощности достичь высокой скорости передачи данных и понизить уровень помех, воздействующих на другие системы. Называемая сверхширокополосной

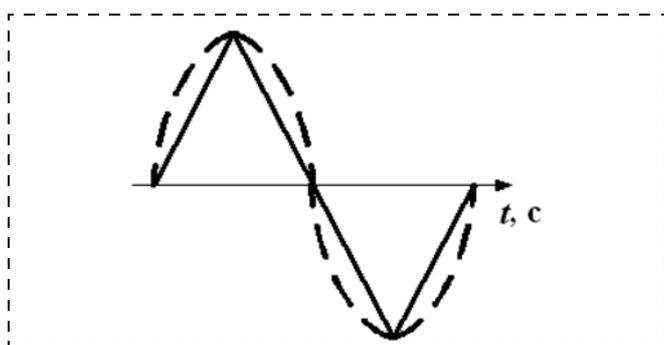


Рис. 1. Связь треугольного импульса с Гауссовым

(СШП) указанная технология в той или иной мере применяется практически во всех системах связи нового поколения (WiFi, WiMax и т. д.), а также в радиолокации.

Цель данной работы — получить минимально короткий Гауссов импульс. Схемы, образующие импульсы, соответствующие первой производной Гауссова импульса (монопульс), используют в качестве входного сигнала треугольный импульс. На рис. 1 видно, что длительность полезного сигнала пропорциональна продолжительности основания треугольника.

В свою очередь, треугольный импульс получается путем логического сложения переднего и заднего фронтов меандра. В следующих работах используются генераторы треугольных импульсов, которые не используют подстройки, связанные с продолжительностью импульса. В работе [1] рассмотрен передатчик, на выходе которого получается Гауссов монопульс с длительностью 250 пс и амплитудой 100 мВ. В следующей работе [2] описан передатчик, который вырабатывает импульсы с длительностью 340 пс. Представленные в этих работах передатчики имеют минимальную длительность выходных монопульсов среди своих аналогов. Монопульсы были получены с помощью генератора треугольных импульсов со стационарной длительностью, а она выбирается разработчиком как средняя величина между минимальной и максимально возможной. Такие же генераторы применяются для построения СШП сигналов, называемых радиоимпульсами, и производных от Гауссова импульса 6-го порядка и выше [3, 4]. Так как в процессе формирования кристалла с необходимой схемой произойдет уход параметров в среднем на 5–10 %, а поскольку вырабатываемые треугольные импульсы имеют длительность сотни пикосекунд, то отклонение от нормы можно увеличить до 15 %. При настройке схемы на минимальную длительность высока вероятность получить треугольный импульс с амплитудой, которая будет ниже требуемой. А также в результате внешних влияний будет происходить временный уход параметров.

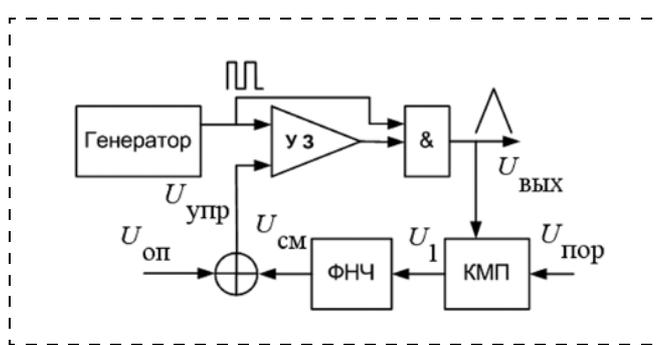


Рис. 2. Структурная схема генератора треугольных импульсов

Для того чтобы снизить эти отклонения параметров, предлагается использовать метод, блок-схема которого изображена на рис. 2. Генератором на рис. 2 обозначен блок, вырабатывающий меандр с частотой 333 МГц, УЗ — элемент задержки, управляемый напряжением [7], КМП — пороговое устройство, ФНЧ — фильтр нижних частот.

Генератор формирует прямоугольные импульсы со скважностью 2, которые поступают на один из входов схемы И—НЕ. На второй вход этой схемы поступают эти же импульсы, задержанные на величину  $\tau$ , определяемую напряжением задержки. Треугольная форма получается путем сложения в схеме И—НЕ переднего и заднего фронтов прямоугольных импульсов, поступающих на ее входы (рис. 2).

Цепь обратной связи, вырабатывает напряжение  $U_{упр}$ , управляющее задержкой. На вход блока КМП поступает напряжение  $U_{вых}$ , которое сравнивается с пороговым напряжением  $U_{пор}$ . Выходная характеристика блока КМП описывается формулой

$$U_1 = \begin{cases} U_{вых}, & \text{если } \max(U_{вых}) > U_{пор}; \\ 0, & \text{если } \max(U_{вых}) < U_{пор}. \end{cases}$$

Длительность выходного импульса  $\Delta t = T - \tau$ , где  $T$  — период меандра. Напряжение  $U_{см}$  на выходе пропорционально среднему значению за период напряжению  $U_1$ :

$$U_{см} \cong \frac{1}{T} \int_0^T U_1(t) dt = \frac{T - \tau}{T},$$

где  $m$  — масштабный коэффициент.

В результате напряжение, управляющее частотой ГУН (генератор, управляемый напряжением), оказывается равным

$$U_{упр} = U_{см} - U_{оп}.$$

Учитывая, что длительность задержки определяется соотношением  $\tau = \tau_0 + m_f U_{упр}$ , где  $\tau_0$  — время задержки при  $U_{см} = 0$ ,  $m_f$  — коэффициент преобразования управляющего напряжения в длительность задержки, получаем:

$$\tau = \tau_0 + m_f \frac{1}{T} \int_0^T U_1(t) dt - U_{оп}.$$

Оценим величину шума, возникающую в цепи обратной связи данной системы. Будем считать, что изменение амплитуды следующих друг за другом треугольных импульсов на величину  $|\Delta A|$ , по-

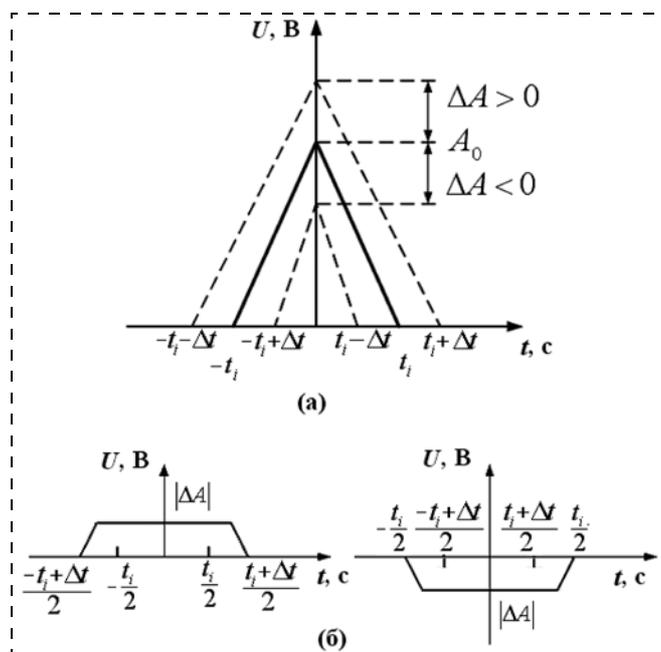


Рис. 3. Изменение амплитуд треугольных импульсов (а); эквивалентный шум (б)

казанную на рис. 3, а, вызвано шумом в системе (рис. 3, б).

Спектральная плотность выходных треугольных импульсов определяется формулой [6]

$$S(\omega) = -\frac{8A_0}{\omega^2 t_i} \sin^2\left(\frac{\omega t_i}{4}\right), \quad (1)$$

а трапецидального шумового сигнала (рис. 3, б) — формулой

$$S(\omega) = -\frac{8A_0}{\omega^2 t_\phi} \sin \frac{\omega \tau_\phi}{2} \sin \frac{\omega \tau_\phi}{2} \left(\frac{T}{\tau_\phi} - 1\right), \quad (2)$$

где  $\omega$  — частота сигнала;  $\tau_\phi$  — смещение фазы сигнала.

Формула (2) позволяет определять спектр шума на выходе генератора при флуктуациях амплитуды выходных сигналов.

На рис. 4 показаны результаты расчета по формулам (1), (2) спектральной плотности сигнала и шума в предлагаемой схеме. При построении рис. 4 использовался изображенный на рис. 5 разброс амплитуд  $\Delta A$  выходных импульсов, полученный в результате моделирования разработанной схемы САПР "Cadence", в которой применялся блок управляемой задержки (рис. 6).

На рис. 7 представлен график спектральной плотности треугольного импульса и шум генератора, полученные в результате моделирования в САПР "Cadence".

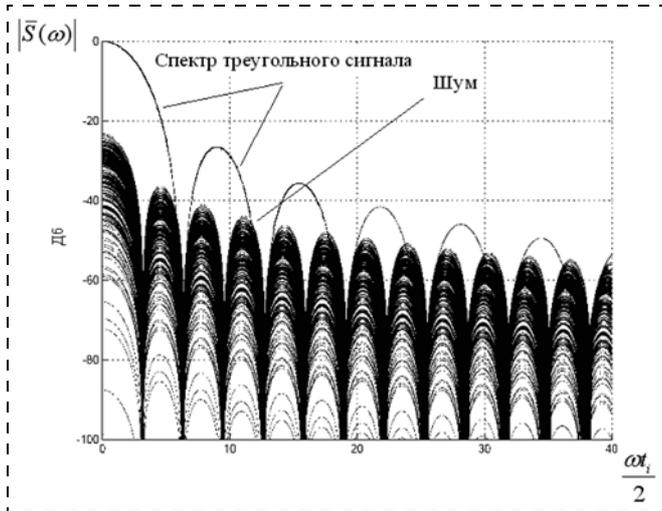


Рис. 4. Спектр треугольного импульса на фоне шума

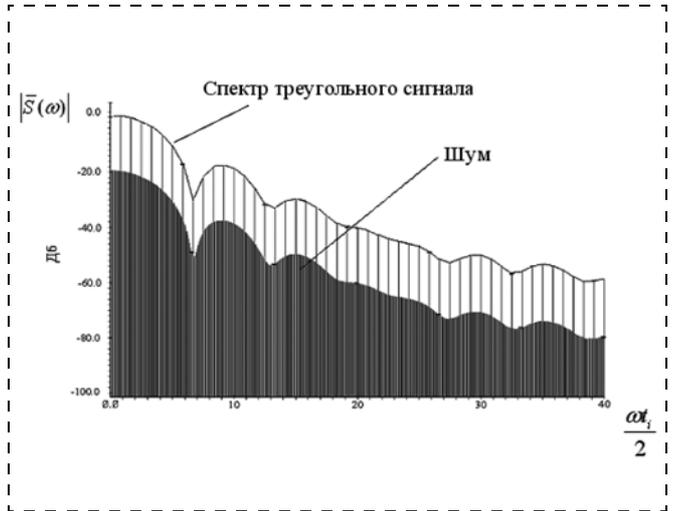


Рис. 7. Экспериментально полученный спектр треугольного сигнала на фоне шума



Рис. 5. Распределение амплитуд выходных треугольных импульсов

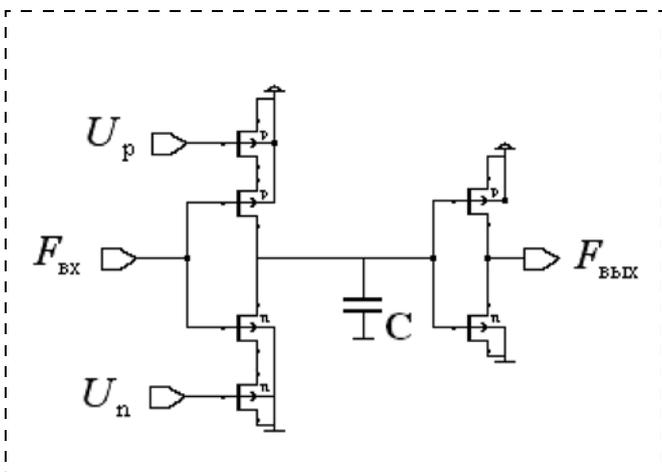


Рис. 6. Схема управляемой задержки:  $U_p$  и  $U_n$  — управляющие напряжения;  $F_{вх}$  — входной сигнал;  $F_{вых}$  — задержанный сигнал

Приведенный выше расчет средней спектральной плотности треугольного импульса полностью совпадает со спектральной плотностью, полученной в результате эксперимента. Уровень шума в результате эксперимента оказался на 5–6 дБ больше, чем в аналитической части. Эту разницу можно объяснить тем, что в результате расчета невозможно учесть все факторы, влияющие на уровень шума, например, шумы генератора прямоугольных импульсов и т. п.

#### Список литературы

1. Bagga S. V., Haddad G., Serdijn W. A. A PPM Gaussian pulse generator for ultra-wideband communications // Proceedings of the 2004 IEEE international symposium on circuits and systems // IEEE. 2004. P. 109–112.
2. Stoica L., Tiuraniemi S., Oppermann I. An Ultra Wideband Low Complexity Circuit Transceiver Architecture for Sensor Networks // Circuits and Systems, IEEE International Symposium. ISCAS 2005. 2005. P. 364–367.
3. Wentzloff D. D., Chandrakasan A. P. A 3.1-10.6 GHz ultra-wideband pulse-shaping mixer // Radio Frequency integrated Circuits (RFIC) Symposium, 2005. IEEE 2005.
4. Mehdi Salehi, Abdolreza Nabavi. An adaptable UWB pulse generator for high-rate applications // IEICE Electron. Express. 2007. Vol. 4. N 8. P. 232–237.
5. Гурьев А. В., Воронин С. Е. Генератор гауссовских импульсов для сверхширокополосных приемопередатчиков // Известия вузов. Электроника. 2008. № 4. С. 78–79.
6. Галустой Г. К., Гоноровский И. С., Демин М. П. и др. Радиотехнические цепи и сигналы. Примеры и задачи. М.: Радио и связь. 1989. С. 17–21.
7. Goran S. J., Stojcev M. K. Current starved delay element with symmetric load // International Journal of Electronics. 2006. Vol. 93. N 3. P. 167–175.

# МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

УДК 621 (075.8)

**С. И. Ветров**, ген. директор, ОАО "КП" ("Красный Пролетарий"), г. Москва,  
**В. С. Горохов**, директор, ООО "КП-Алмаз", г. Москва,  
**А. В. Скворцов**, канд. техн. наук, проф. Московский государственный открытый университет, e-mail: skvortsov\_a@mail.ru,  
**Д. А. Чмырь**, ген. директор ООО "Генон",  
**Д. А. Скворцова**, вед. инж., фирма "Крафтвей Технолоджи", Москва

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

*Рассмотрены предпосылки развития нанотехнологических производств в условиях глобализации рыночной экономики и полной компьютеризации производства на основе сетевых информационных технологий. Рассмотрены характеристики процессов нанорезания и принципы формирования распределенных производственных систем и виртуальных предприятий на основе технологической гиперсреды с использованием CALS- и PLM-технологий информационной поддержки жизненного цикла изделий. Рассмотрены системные аспекты создания виртуальных предприятий и их единого информационного пространства для изготовления нанотехнологической продукции.*

**Ключевые слова:** гибкий нанотехнологический модуль, нанорезание, распределенная производственная среда, виртуальное предприятие, единое информационное пространство.

### 1. Постановка задачи

Производство изделий машиностроения в условиях мирового рынка имеет весьма сложный характер. Оно основывается на обеспечении высокого качества продукции, конкурентоспособности, экономической эффективности предприятий, получения наиболее *высокой прибыли*. В настоящее время уровень производства отечественной машиностроительной продукции неуклонно уменьшается. Так, объем реализованной продукции в станкостроении на рубеже 2008—2009 гг. сократился по меньшей мере в 2,5 раза. Это связано с несовершенством экономической и технической политики, устаревшими принципами управления технологическими системами (ТС)

и производственными бизнес-процессами, крайне низким уровнем автоматизации и компьютеризации. Принципы технической (ТехПП) и ее важнейшей части — технологической (ТПП) подготовки производства, которые основаны на каскадном методе проектирования единичных изделий (ЕСКД) устарели и не соответствуют международным стандартам в области информатизации и CALS-технологий (ГОСТ Р ИСО 10303 STEP). Так, в передовых странах сроки ТПП и выполнения заказа по изготовлению комплекта деталей, включая изготовление сложных по конфигурации заготовок, за счет полной компьютеризации производства с использованием сетевых CALS- и Интернет-технологий не превышают 10...25 ч.

Так, согласно ГОСТ Р ИСО 9000 параметры вновь разрабатываемых изделий, предназначенных для реализации на открытом мировом рынке, должны полностью удовлетворять требованиям потребителей, а в интегральном выражении превышать текущий мировой уровень. Продукция должна выпускаться в режиме *крупносерийного* и *массового* производства, обладающего для безусловного удовлетворения запросов и требований потребителей высокой степенью гибкости, и реализовываться в рамках приемлемой цены. При этом сроки создания изделий на основе полной компьютеризации жизненного цикла (ЖЦ) должны быть в максимальной степени сокращены, минимизированы производственные циклы.

Особенно актуален переход к современным принципам создания и полной информационной поддержке ЖЦ нанотехнологической продукции в рамках государственной корпорации Роснано [1]. Достижения нанотехнологий должны быть внедрены в широкую промышленную практику.

### 2. Краткие характеристики процессов нанообработки в машиностроении

Одним из основных направлений является реализация процессов нанорезания лезвийным и абразивным инструментом. Целями проекта, излагаемого в данной статье, являются:

- создание обобщенного множества компонентов конфигурации базовых обрабатывающих гибких нанотехнологических модулей (ГНТМ) для различных методов лезвийной и абразивной обработки посредством их широкого внедрения в отрасли машиностроения;
- реализация открытой распределенной производственной среды (РПС) для организации виртуальных предприятий (ВП) с максимально широкими технологическими и производственными

возможностями для изготовления нанотехнологических машин и ультрапрецизионной техники на базе холдинга Ростанкоинструмент и предприятий других отраслей;

- разработка и внедрение единого информационного пространства функционирования РПС и ВП на базе сети Интернет и корпоративных сетей типа Интранет с использованием унифицированных программных многоагентных систем (МАС) и семантической информационно-поисковой среды (СИПС);
- организация на этой основе серийного производства обрабатывающих ГНТМ (станков) и ультрапрецизионной техники для различных отраслей промышленности посредством компьютерного управления производственными бизнес-процессами.

На основе имеющегося научно-производственного опыта предполагается широкое внедрение обрабатывающих нанотехнологических модулей (базовые образцы МК6523Ф4 и МК6510Ф4) с сетевым компьютерным управлением для различных отраслей промышленности и методов обработки (рис. 1, см. третью сторону обложки). В их основу заложены принципиально новые технические решения.

В ОАО "КП" в качестве материалов изделий при обработке методами алмазного нанорезания используются: цветные металлы (алюминий, медь, золото, никель, цинк, серебро) и многочисленные специальные сплавы на их основе; кристаллы для проходной и отражающей оптики (сульфид и селенид цинка; фториды магния, кальция, бария; арсенид галлия; ниобад лития и др.); полупроводниковые материалы (кремний, германий); полимерные материалы (акрил, поликарбонат, полистирол и многие другие); твердые, прочные и хрупкие материалы (молибден, вольфрам, ситаллы, кварцевое и опти-

ческое стекло, керамика). Примеры обработки приведены на рис. 2 (см. третью сторону обложки).

При использовании нанорезания инструментом из природного алмаза получены следующие значения шероховатости обработанной поверхности Rz: по цветным металлам и их сплавам 0,05...0,02 мкм; по закаленным сталям 0,06...0,035 мкм; по германию и кремнию 0,06...0,03 мкм; по плавленому стеклу 0,4...0,2 мкм. По параметру Ra методами нанорезания достигнута шероховатость 2...5 нм. Технология алмазного микрошлифования, апробированная в ОАО "КП", включает в себя: разработанное станковое технологическое оборудование; специальные алмазные шлифовальные круги; экспериментально отработанные методы и режимы обработки; смазывающе-охлаждающую жидкость; методику метрологического контроля. Реально полученная и проконтролированная шероховатость поверхности пластины из кварца для ультрапрецизионных кварцевых резонаторов составила Ra = 5...9 нм.

Имеется научно-технический задел по созданию ультрапрецизионных станков для обработки хрупких материалов, в том числе кварцевого стекла, различными способами: алмазное точение; фрезерование; нанометрическое шлифование оптических поверхностей. Внедрены новые методы контроля нанотехнологической продукции (рис. 3).

### 3. Функционирование производственного предприятия в условиях рыночной экономики и глобальной информатизации

Рассмотрим основные аспекты создания промышленных производств нового типа.

В основу создания изделий должно быть положено достижение высоких значений показателя наукоемкости:

$$P_H = P_{e,п} / C_{м,э}, \quad (1)$$

где  $P_{e,п}$  — цена единицы выпускаемой продукции, формируемая на открытом рынке;  $C_{м,э}$  — стоимость приобретаемых предприятием материальных элементов (сырья, материалов, полуфабрикатов) и энергии, затрачиваемых на единицу продукции. Показатель наукоемкости  $P_H$  для добывающих отраслей промышленности не превышает 2...2,5, для отраслей, перерабатывающих сырье, —  $10^1$ , для станкостроения и автомобильной промышленности он достигает  $10^2$  и более, для промышленных роботов и станочных комплексов с ЧПУ, авиационной, космической, электронной, атомной техники превышает  $10^2...10^3$ , а для компьютерных систем и программ —  $10^4...10^6$ . Следовательно, в условиях рынка наиболее эффективной сфе-

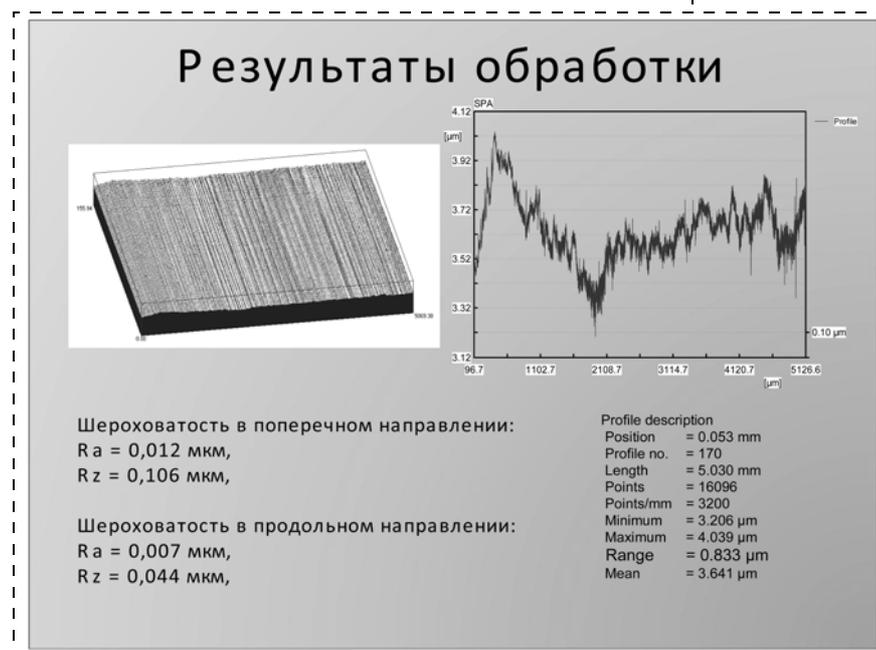


Рис. 3. Результаты обработки одной из поверхностей, измеренной на конфокальном микроскопе Nanofocus

рой деятельности предприятий является выпуск качественной *научоемкой продукции*, основанной на самых передовых достижениях науки, техники и нанотехнологий, содержащих интеллектуальную собственность высокой стоимости.

Имеются два пути повышения прибыли в расчете на единицу продукции  $\Pi$ , которая находится как

$$\Pi = \Pi_{e,\Pi} - C_0, \quad (2)$$

где  $\Pi_{e,\Pi}$  — рыночная цена единицы продукции;  $C_0$  — затраты, приходящиеся на единицу продукции, т. е. ее суммарная себестоимость, которая определяется производственными затратами  $C$  и накладными расходами  $N = F_N(C)$ . Учитывая формулу (1), получим

$$\Pi = \Pi - [C + F_N(C)] \rightarrow \max. \quad (3)$$

Величина  $\Pi_{e,\Pi}$  в условиях рыночной конкуренции определяется исключительно потребительскими свойствами, т. е. ее интегральными показателями качества, зависящими от  $\Pi_H$ , заложенного в конструкторскую документацию, а также совершенством производственного исполнения  $S_H$ . Таким образом,  $\Pi = F_{\Pi}(\Pi_H, S_H)$ . Окончательно имеем

$$\Pi = F_{\Pi}(\Pi_H, S_H) - [C + F_N(C)] \rightarrow \max. \quad (4)$$

При этом

$$F_{\Pi}(Y, S_H) \rightarrow \max; C + F_N(C) \rightarrow \min. \quad (5)$$

Затратная часть выражений (3) и (4) во многом определяется совершенством технологических процессов (ТП), их производительностью и себестоимостью.

Валовая прибыль предприятия, зависящая от объема выпуска продукции  $N_{\Pi i}$  данного наименования (модификации) за плановую единицу времени  $T_{\Pi i}$  (год, квартал, месяц, сутки), равна  $\Pi_i = N_{\Pi i} \{F_{\Pi}(\Pi_H, S_H) - [C + F_N(C)]\}$ . Величина  $N_{\Pi i}$  в рыночной экономике зависит от объема полученных заказов  $N_{zi}$  и фактической производительности  $\Pi_{pi}$  ТС предприятия.

Объем привлеченных предприятием заказов  $N_{zi}$  ( $N_{\Pi i} \approx N_{zi}$ ) при всеобщей глобализации рынка находится в сложной функциональной зависимости от условий их реализации (качество  $K$ , цена  $\Pi$ , скорость исполнения заказа  $V_3$ ), имиджа фирмы (бренда)  $I$ , степени его конкурентоспособности  $K_c$ , развития товаропроводящей сети  $T_{п.с.}$ , наличия технологий быстрых информационных взаимодействий с партнерами по бизнесу  $I_b$  для установления кооперативных производственных связей. Таким образом, имеется динамическая зависимость  $N_{ziT} = f_N(K, \Pi, V_3, I, K_c, T_{п.с.}, I_b)$ . Как правило, объем заказов в условиях рыночной экономики *инновационного типа* в значительной степени носит случайный характер. Характеристики потока заказов имеют в значительной степени индивидуальные особенности, а объем *единичного* заказа может быть относительно небольшим.

Время реализации единичного заказа  $T_{рzi}$  объемом  $N_{zi}$  зависит от длительности ТехПП —  $T_{ТехПП}$ , непроизводительных потерь рабочего времени  $T_{пр.в.}$ , суммарного штучно-калькуляционного времени

$t_{шт.ки}$  и числа параллельно организованных технологических потоков  $m_{п.т.п.}$ :  $T_{рzi} = T_{ТехПП} + T_{п.р.в.} + N_{zi}t_{шт.ки}/m_{п.т.п.}$ . Тогда производительность ТС предприятия в течение планового срока  $T_{\Pi i}$  при реализации единичного заказа будет равна  $\Pi_{piT} = T_{\Pi i}/(T_{ТехПП} + T_{п.р.в.} + N_{zi}t_{шт.ки}/m_{п.т.п.})$ .

Внедрение научных разработок связано со значительными экономическими затратами и существенными рисками. Вероятности рисков  $R_i$  определяются множеством факторов, зависящих от квалификации персонала, привлекаемого для решения поставленной задачи, степени стимуляции работников к труду и эффективному взаимодействию. Риски зависят от показателей технологической освоенности элементов продукции, совершенства организации бизнес-процессов, стратегического, тактического и текущего планирования и управления. Низкая инвестиционная отдача с учетом рисков увеличивает сроки окупаемости бизнес-проектов:  $T_{ок} = P_{и}/[(1 - R_i)C_{\Sigma}]$ , где  $C_{\Sigma}$  — объем реализованной продукции за год, руб.;  $P_{и}$  — размер инвестиций. Чем меньше уровень (вероятность) рисков и объем потребных инвестиций, больше показатель наукоемкости, тем более привлекателен данный бизнес-проект для инвесторов.

В настоящее время для отечественной промышленности характерны высокие значения  $T_{ТехПП}$ ,  $T_{п.р.в.}$  и  $R_i$ , поскольку состав ТС предприятий в целях экономии минимизирован, степени автоматизации и гибкости производств, их конкурентоспособность достаточно низкие.

Для этого необходимо внедрить полный комплекс современных сетевых компьютеризированных бизнес-процессов подготовки и ведения производства, активный и эффективный маркетинг продукции в Интернет-среде, процедуры электронного бизнеса, тотальный менеджмент качества с использованием производственного консалтинга [2].

Следует организовать сквозной поток работ *workflow*, внедрить удаленное управление станочными комплексами с ЧПУ. Значения величин  $T_{ТехПП}$ ,  $T_{п.р.в.}$  и  $R_i$  могут быть в несколько раз сокращены за счет повышения серийности, создания расширенной технологической гиперсреды [3], выравнивания загрузки ТС посредством интеграции и быстрого реконfigurирования производств на базе полномасштабного внедрения информационных компьютерных технологий (ИКТ). Производительность ТС предприятия с учетом высокой степени гибкости и реконfigurируемости должна иметь рациональную функциональную и временную избыточность при соблюдении соотношения  $N_{ziT} < \Pi_{piT} \cdot T_{\Pi i}$ .

Сквозной поток работ *workflow* на машиностроительном предприятии, совершенствование его структуры и корпоративных бизнес-процессов может быть организован с помощью автоматизированных систем моделирования и анализа эффективности при наличии развитой компьютерной сети. Поддержка *workflow* выполняется системами CALS-технологий PDM и ERP. В процессе непосредственного производства осуществляется календарное планиро-

вание и организация его правильного и ритмичного функционирования.

Значительную роль в создании передовой наукоемкой продукции с интеллектуальной собственностью высокого уровня стоимости играют относительно небольшие по размеру фирмы малого и среднего бизнеса, а также интегрированные научные сообщества. Активатором капитализации предприятия в данном случае является интеллектуальная деятельность в сфере нанотехнологий, опирающаяся на собственный труд и эффективные информационные взаимодействия. Предприятие малого бизнеса способно быстро развернуть постановку продукции на производство с использованием широкой производственной кооперации, реализуемой на базе ИКТ по сети Интернет.

#### **4. Конфигурационное управление при создании и производстве изделий**

Современная продукция, реализуемая на открытом рынке, должна представлять собой развитый комплекс, состоящий из *стандартных и унифицированных компонентов*. Подобным методом повышается серийность производства, снижаются затраты на ТехПП и достигается высокая прибыльность. Компонентом называется независимый элемент, модуль, система, которые предназначены для многократного применения в других изделиях и проектах с высокой экономической эффективностью. При этом его внутреннее устройство и/или содержание для пользователя или предприятия, выпускающего продукцию в виде некоторого комплекса, чаще всего, не имеет особого значения. На основе компонентов проектируются изделия, технологии, производственные процессы, компьютерные программы и т. п. Они могут быть выполнены любым производителем на основе рыночной конкуренции посредством *унификации, стандартизации*, расширенных протоколов применения и/или взаимодействия. Состав компонентов комплекса продукции, соответствующий поступившему заказу, определяется его текущей *конфигурацией*, быстро реализуемой в условиях гибкого автоматизированного и реконфигурируемого производства (ГАРП), функционирующего на основе технологических принципов массового изготовления продукции. Информационное и топологическое отображение, набор правил или функций, служащих для описания состояния, поведения (функционирования), изготовления и способов применения компонента называется *компонентной моделью*. Принципы конфигурирования, стандартизации и взаимозаменяемости комплекса и компонентов определяются на ранних стадиях создания изделий. Их параметры проектируются с учетом опережающего функционального и параметрического задела на будущие периоды с возможностью дальнейшей модернизации.

Требования менеджмента качества (ГОСТ Р ИСО 9000) вызвали необходимость создания, производства и управления значительным числом конфигураций продукции. Очевидно, что управление большим числом конфигураций ГНТМ крайне сложно. Большое число специалистов вынуждены заниматься ге-

нерацией и поддержкой модифицированной продукции. Это значительно увеличивает объемы перерабатываемой информации, которые могут превысить некоторый критический объем. В результате может появиться определенное количество несоответствий, что резко снижает качество продукции, а сама поддержка ее качества и работоспособности становится весьма трудоемкой. Может произойти необратимый "развал" структуры продукции с неизбежными экономическими потерями. Управление сложной конфигурацией возможно только на основе ИКТ. Так, впервые ГОСТ 2.053—2006 [4] и ГОСТ Р ИСО 10303-44—2002 (STEP) [5] предусматривают создание электронных структур изделий (ЭСИ) и компьютерное управление конфигурацией продукции на основе CALS/ИПИ-технологий. Принципы внедрения ЭСИ в реальное производство не разработаны. Авторами создана эффективная компьютерная методология управлениями конструкторскими, технологическими и производственными ЭСИ и обобщенным множеством компонентов конфигурации (ОМКК) на основе теории графов и реляционных баз данных (БД) с использованием *MS SQL Server Enterprise Manager* [6]. Так, в новом компьютеризированном производстве ТПП партия ПК оригинальной конфигурации производится за 2...3 мин, комплектация компонентами — за 5...10 мин, а сборка — за 20...40 мин [7]. Создание ОМКК из наилучших компонентов, их выбор, обеспечение поставок, реконфигурация производств, изготовление изделий по случайно поступающим заказам потребителей и последующее логистическое обслуживание возможны только при использовании сетевого информационного обмена на основе Интернет.

Наивысший уровень стандартизации, известный за всю историю промышленной практики, имеет среда Интернет. Принципы создания Интернет могут быть распространены на материальную и другую программную продукцию. Велика в этой связи роль стандартов ISO класса STEP (ГОСТ Р ИСО 10303-21, 22), обеспечивающих конвертацию данных между различными CAD/CAM/CAPP/PDM и другими системами CALS/ИПИ-технологий (AutoCAD, Autodesk Inventor, Unigraphics, Catia, SolidWorks, T-FLEX, Компас и т. п.). Наиболее эффективен электронный бизнес при создании и реализации виртуальных моделей ГНТМ, созданных на основе комплексирования и компонентного построения. ОАО "КП" рассматривает возможность комплексного перехода процессов создания и производства технологических комплексов с ЧПУ, включая проектирование и изготовление ГНТМ, к компонентному построению и компьютерному управлению конфигурацией согласно ГОСТ 2.053—2006, ГОСТ Р ИСО 9001(4) и ГОСТ Р ИСО 10303-44.

#### **5. Создание распределенных производственных систем**

Следовательно, одним из главных факторов, связывающим указанные требования в единое целое, является полная компьютеризация и сетевое информационное сопровождение ЖЦ продукции на основе

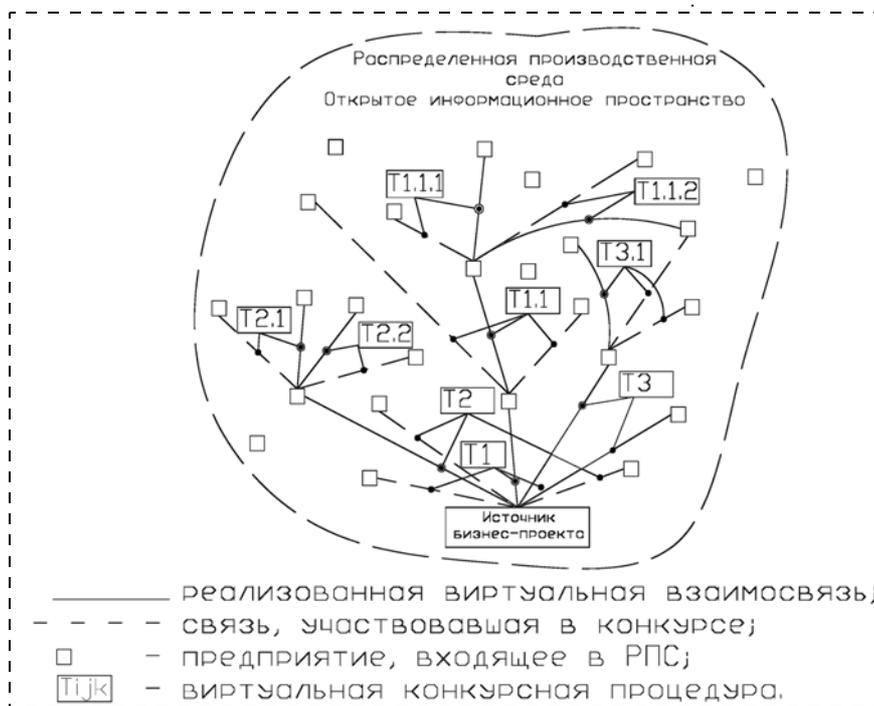


Рис. 4. Графы образования связей в распределенной производственной среде

CAD/CAE/CAM/CAPP/PDM/MRP2/ERP/ILS-систем CALS/ИПИ-технологий. Управление должно быть основано на четком информационном обеспечении производственных процессов, глубоком итерационном планировании производства с использованием его имитационного моделирования и многофакторной статистической оптимизации в рамках распределенной производственной среды (РПС), охваченных сетевыми ИКТ [8], [9].

РПС представляют собой географически разнесенные, юридически независимые, информационно связанные между собой производственные системы, имеющие в своем составе комплексы создания и информационного сопровождения ЖЦ изделий, соответствующего оборудования и технологических процессов, необходимых для изготовления продукции конкретного вида [8]. В рамках РПС производственные связи имеют динамически изменяемый характер и устанавливаются на основе конкурсных процедур. Для выполнения конкретных задач по изготовлению продукции образуется соответствующая производственная конфигурация, характеризующаяся некоторым достаточно сложным графом как ациклического, так и циклического характера (рис. 4). При наличии в процессе создания сложной продукции задач, связанных с проведением научных исследований, можно говорить о распределенной научно-производственной среде (РНПС). Термин РНПС целесообразно использовать в тех случаях, когда затраты на исследования и опытно-конструкторские работы превышают 40...50 % от объема инвестиций.

Таким образом, речь идет о комплексном совершенствовании бизнес-процессов в машиностроении и внедрении *информационных (виртуальных) технологий и компьютеризированных производственных*

*систем* в области нанотехнологий, без быстрого развития которых действительный прогресс отечественного машиностроения совершенно не состоятелен. Именно на этой базе возможно создание эффективной продукции на базе ОМКК, образование информационной технологической гиперсреды, организация гибкого автоматизированного и быстро реконфигурируемого производства, полностью адаптированного к условиям открытого мирового рынка.

В условиях рыночного расширенного воспроизводства сложной нанотехнологической продукции возникают две основные задачи. Для предприятия разработчика продукции необходимо наиболее быстро и экономически эффективно осуществить ее реализацию при наивысшем уровне качества, а для производственного предприятия — обеспечить наиболее полную загрузку оборудования и максимизировать получаемую прибыль. Следует учитывать огромный объем мировой научно-технической и патентной информации, сложность связей и ограниченность временных, материальных, финансовых и иных ресурсов, используемых для реализации бизнес-процессов, необходимость принятия оптимизированных проектных решений. При случайном характере заказов и необходимости использования широкого спектра новых технологий быстрое изготовление новой научно-технической продукции возможно только при использовании *производственно-технологической гиперсреды РПС*, формируемой на базе ИКТ [3]. Имеющее место в настоящее время разрозненное применение компьютерных систем CALS/ИПИ- и PLM-технологий не позволяет достичь должной эффективности и производительности производственных систем. Зачастую реализация заказа становится невозможной ввиду отсутствия на предприятии возможности выполнения одной или нескольких технологических операций. Наличие сети Интернет позволяет *организовать подобные процессы на совершенно новом качественном уровне*.

## 6. Условия образования и функционирования виртуальных предприятий в нанотехнологической отрасли

Для решения конкретных задач на базе РПС или РНПС возможно создание целевых так называемых *интеллектуальных (виртуальных) образований*: предприятий, групп, организаций, сообществ и т. п., которые могут работать в распределенном режиме, используя компьютерные сети и технологии. Интеллектуальное, в дальнейшем, виртуальное производственное образование представляет собой некоторый функционирующий объект, который может не иметь

юридически оформленной организационной базы (устава, положения, протокола). Оно создается в рамках РПС и любых других предприятий для решения определенной проблемы на временной основе.

*Виртуальное предприятие (ВП) есть производственно-технологический объект, образованный с целью производства конкретной продукции высокого научно-технического уровня.* В задачи, решаемые в рамках ВП, могут входить процессы создания изделий и технологий (выполнения проектов, разработки комплексов конструкторско-технологической документации, проведения ТехПП), организации сбыта (продажи), поставок, монтажа, пуско-наладочных работ, выполнения логистических операций, эксплуатационного и ремонтного обслуживания, модернизации изделий и др. В его функции включаются разработка компьютерных программ, моделей, выполнение законченных научно-технических исследований, выдача аналитических рекомендаций и т. п. *Виртуальным производством* следует считать производство, образованное в РПС в целях выпуска новейшей продукции совокупностью юридически независимых предприятий, организационно взаимодействующих через процедуры электронного бизнеса с использованием сетевых ИКТ.

Широкие кооперированные связи и применение компьютерных сетей для передачи данных совершенно обычны для современных предприятий. Использование методологии РПС и ВП подразумевает такие состояния, когда вся деятельность по реализации бизнес-процессов, включая распределенные взаимодействия, осуществляются в компьютерном режиме, а ИКТ и CALS/ИПИ-технологии *полностью интегрированы в процессы создания изделий.* ВП при своем создании и функционировании имеет целый ряд особенностей.

В виртуальном режиме осуществляются два типа электронного бизнеса. Тип В2В (*Business-to-Business*) заключается в автоматизации обмена коммерческими данными между предприятиями-партнерами при продаже продукции третьей стороне. Бизнес типа В2С (*Business-to-Customer*) предполагает автоматизацию обмена информацией между предприятием-производителем продукции и потребителями. Электронные формы бизнеса уже достаточно широко развиты. В целом, объемы электронного и информационного бизнеса в мире составляют многие сотни миллиардов долларов в год. ВП, как правило, имеет ограниченную юридически оформленную базу. Его деятельность основывается на договорной основе конкретного чаще всего временного характера и взаимном интересе (творческом, научно-техническом, экономическом, коммуникационном и др.).

При функционировании ВП достигаются значительные преимущества, а именно: использование мировых информационных и научно-технических ресурсов; комплексное решение производственных задач; быстрота и гибкость образования связей и структур; реальная возможность создания реконфигурируемого производства; объективные возможности принятия оптимизированных решений; неогра-

ниченное расширение технологического потенциала; минимизация капитальных затрат; широкий охват секторов рынка; возможность задействования географически удаленных технических объектов и производственных систем [8].

Использование мировой компьютерной информационной среды *в десятки раз* ускоряет реализацию бизнес-проектов в области наукоемкого производства. Достигается значительная экономия денежных средств, различного рода ресурсов и времени. ВП характеризуются отсутствием организационно-экономического последствия, поскольку немедленно по мере выполнения бизнес-проекта экономическое взаимодействие, как правило, прекращается. Число физических лиц в постоянном штате ведущего предприятия и необходимые производственные площади минимизируются.

К решению возникших задач привлекаются наиболее квалифицированные специалисты, создание и производство компонентов сложных изделий ведется на специализированных предприятиях, имеющих за счет концентрации заказов *наиболее высокие уровни серийности и качества* продукции, достигаются наименьшие трудоемкость и себестоимость выполнения работ. В развернутом процессе создания новой научно-технической продукции в режиме непрерывного реинжиниринга непрерывно возникают, реализуются и совершенствуются новые бизнес-проекты.

ВП может иметь относительно временный характер. По мере завершения задач связи, его образующие, обычно прекращаются. Вместе с тем, при накоплении опыта взаимодействия ВП его задачи и функции могут быть расширены. При необходимости ВП может быть преобразовано в юридическое лицо, в виде одной из форм частной или смешанной форм собственности, т. е. обеспечивается возможность перехода к функционированию на постоянной юридической и экономической основе.

Процедуры функционирования ВП содержат также некоторые риски. Так, его географически распределенная структура предполагает отсутствие возможности прямого управления. Работа в открытой информационной среде вызывает необходимость усиленной защиты коммерческой, производственной и научно-технической информации, применения сложных сетевых и программных комплексов и работу при относительно нечетких договорных связях. Имеются риски, связанные с возможностью немотивированного разрушения функциональных связей, например, при получении виртуальным партнером более выгодного заказа, что усложняет дистанционное управление. Другая группа рисков вызывается возможностью задержек и сбоях при передаче информации, в частности, вследствие перегрузки сетевых серверов и каналов связи.

ОАО "КП" рассматривает возможность комплексного перехода процессов создания и производства ГНТМ с ЧПУ и другой нанотехнологической техники в рамках РПС холдинга Росстанкоинструмент при участии десятков предприятий к компонентному по-

строению и компьютерному управлению конфигурацией изделий согласно ГОСТ 2.053—2006, ГОСТ Р ИСО 9001 (4) и ГОСТ Р ИСО 10303-44—2002. Только такая методология обеспечивает наиболее рациональный и экономически выгодный подход к созданию и производству широкой гаммы ГНТМ применительно ко всем видам обработки по программам корпорации РоснаноТех, финансируемым из госбюджета. Технические и технологические предпосылки, информационные и программные компоненты для этого уже созданы.

Внедрение ИКТ, методологии РПС и ВП требуют полного совершенствования внутренней организационной среды предприятий реального сектора экономики, которая в большинстве случаев является тяжеловесной, трудоемкой, малопроизводительной и несоответствующей рыночным представлениям. Очевидно, что степень внедрения CALS- и PLM-технологий на предприятиях должна приближаться к 100 %. Необходима полная компьютеризация производства с доведением сетевых ИКТ до каждого рабочего места с возможностью удаленного управления станочными комплексами и визуализации выполняемых операций [7]. Все бизнес-процессы ВП должны находиться в режиме постоянного реинжиниринга. Проектирование изделий и их производственную реализацию целесообразно осуществлять на основе параллельного инжиниринга проектов и технологий.

При выполнении проектов РПС, динамической конфигурации любого ВП необходимо обеспечить их экономическую эффективность и минимизировать размеры инвестиций. Очевидно, что для единого информационного пространства (ЕИП) и интегрированной информационной среды (ИИС) следует обеспечить возможность масштабирования ПО, когда постоянно обновляющиеся версии базового ПО должны автоматически поддерживать ранее разработанные программные компоненты. Необходимо ориентироваться также на складывающуюся в промышленной практике ситуацию. Управление бизнес-процессами, связанное с достижением наивысшей эффективности и ускорением темпов развития, а также их информационной поддержки следует считать наиболее сложной составляющей деятельности ВП. Эти процессы связаны с эвристическим подходом к выбору стратегических концепций и реализации производственной политики, а также с концентрацией, стимулированием усилий интеллектуального и функционального потенциалов предприятия на достижение высоких конечных результатов. Важным аспектом является четкая координация деятельности всех систем предприятия, использование принципа постоянного реинжиниринга

для управления конфигурацией бизнес-процессов и структур. Необходимо использовать математические и алгоритмические методы оптимизации.

## 7. Моделирование бизнес-процессов и совершенствование структур предприятий

При проектировании бизнес-процессов и программной поддержки РПС, ЕИП и функционирования ВП в рамках программно-целевого планирования целесообразно проводить моделирование функциональных, информационных и материальных потоков и процедур с использованием компьютерных систем бизнес-моделирования типа *ARIS (Scheer AG)*, *Business Studio ("Современные технологии управления")* и др. Так, апробированная в ОАО "КП" ("Красный пролетарий") система *Business Studio* разработана для ведения полного цикла проектирования системы управления "Проектирование—Внедрение—Контроль—Анализ". Она позволяет формализовать стратегию ТехПП и контроль ее исполнения; смоделировать и оптимизировать процедуры ТПП; спроектировать гибкую организационную структуру ВП; регламентировать деятельность входящих в него предприятий и подразделений; разработать и распространить регламенты *workflow* в соответствии со стандартами ГОСТ Р ИСО.

Используется визуальное моделирование в виде сформированных на экране ПК стратегических карт, форм описания бизнес-процессов в нотации *IDEFO*, графические представления организационной структуры промышленного предприятия применительно к РПС. Формируются планы-графики в виде диаграмм Ганта, отчеты по выполнению мероприятий и проведенных работ. Одновременно создается оптимизированная компьютерная сеть пред-

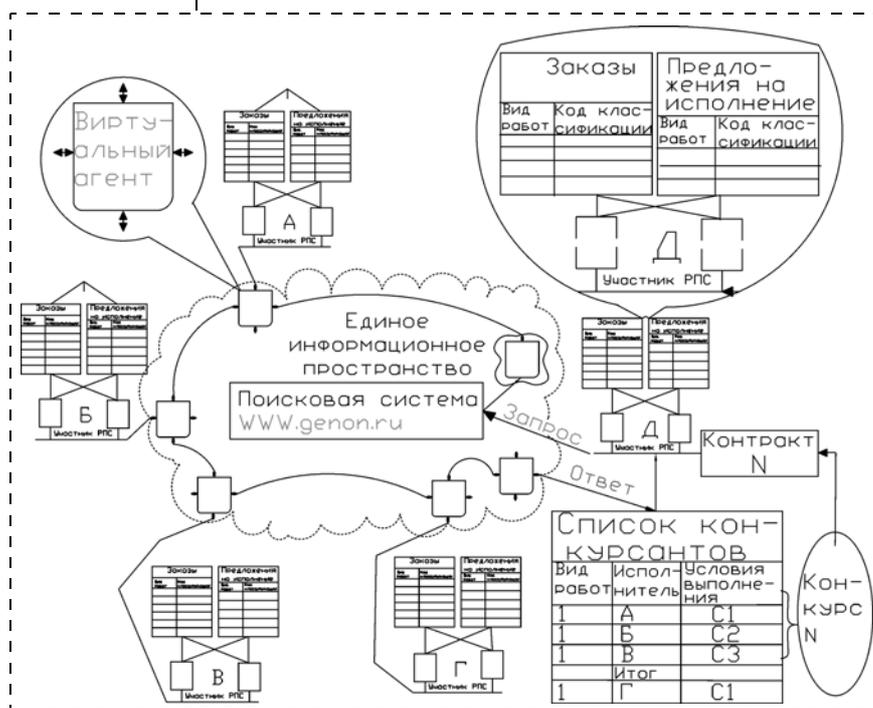


Рис. 5. Схема функционирования виртуальных программных агентов в РПС

приятия, включая подключенные к сети системы ЧПУ технологических модулей. Обеспечивается ускорение ТехПП и сроков выполнения заказов в несколько раз.

## 8. Создание единого информационного пространства

Следует отметить, что простое использование среды Интернет мало что дает. Для эффективной реализации возможностей бизнес-процессов ВП необходимо его системное представление, включающее, прежде всего, в создании *единого информационного пространства* (ЕИП) в виде интегрированной информационной среды (ИИС) специализированного вида с высоким уровнем автоматизации процессов обмена данными и выполнения профессиональных информационных транзакций. Для образования и функционирования ВП необходимы компьютерные сети, библиотеки и БД, соответствующие *программно реализованные средства интерактивного взаимодействия и общения*, компьютерные системы научных исследований, моделирования и информационной поддержки ЖЦ изделий.

Наиболее развитые автоматизированные системы управления распределенных объектов РПС основаны на использовании компьютерной многоагентной среды типа программный менеджер—программный агент [10]. Существует несколько решений создания ЕИП и ИИС. В полностью автоматизированной форме функционирование ЕИП (ИИС) основано на структурированном построении БД, взаимодействующих с виртуальными агентами (рис. 5), размещенными в компьютерных системах предприятий, участвующих в РПС в рамках динамически изменяющихся структур ВП. При создании нового бизнес-проекта информация о его характеристиках разме-

щается в ЕИП. Постоянно функционирующие программные агенты участников РПС автоматически анализируют параметры проекта на соответствие возможностям данного предприятия (наличие соответствующих технологий и свободных производственных мощностей) и выводят их на экран менеджеров в режиме В2В или В2С. На конкретном производственном предприятии с использованием сетевых ИКТ проводится анализ полученных данных (виртуальная предварительная подготовка производства) и в автоматизированном режиме выполняется обмен соответствующими информационными транзакциями.

Фирма, ведущая проект, получает набор предложений, из которых она может выбрать наиболее выгодные и надежные. Осуществляется обмен электронными документами, заверенными электронными цифровыми подписями, которые могут иметь юридическую силу. После заключения электронных соглашений (договоров) производственное предприятие на основе своей внутренней компьютерной сети в режиме параллельного инжиниринга осуществляет полную ТехПП, с использованием Интернет устанавливает связи, передает работы субподрядчикам, приобретает комплектующие, выполняет САЕ/САМ-моделирование и запускает комплект изделий в производство на базе сетевого управления станочными комплексами с ЧПУ. При этом могут возникать многокаскадные производственные кооперированные связи, установленные по сетям передачи данных, включая удаленное управление технологическим оборудованием на основе разработанных САМ-моделей. Таким образом, необходим системный подход к формированию ЕИП и действующих ВП (рис. 6).



Рис. 6. Системный подход к реализации ВП и его информационного пространства

В условиях глобальной автоматизации и информатизации растут потребности всех участников РПС в обмене передовым опытом и быстром нахождении интересующей информации. Имеются проектные решения ЕИП и ИИС централизованной и децентрализованной информационной поддержки деятельности ВП, в том числе с использованием консолей операторов ЕИП. В наиболее простом случае производственные взаимодействия могут быть реализованы посредством создания информационных площадок, однако их эффективность без автоматизации транзакций обмена информацией достаточно низкая.

Наиболее рационально осуществлять функционирование ВП в рамках РПС и удаленное управление технологическими объектами с ЧПУ на основе протоколов Интернет (текстовых описаний процессов передачи данных). В настоящее время признано целесообразным использовать для данных целей специализированные высокоточные информационно-поисковые Интернет-системы (ПОИС), построенные на основе семантических принципов. Так, под руководством одного из авторов создана и функционирует подобная информационная система "Генон" [www.genon.ru](http://www.genon.ru), которую после модернизации и совершенствования можно использовать в качестве программной базы ЕИП.

Архитектура написанной на языке С# серверной части данной семантической ИПС базируется на современной платформе .NET 2.0, предложенной компанией Microsoft, что позволяет ей демонстрировать отличную масштабируемость и адаптируемость, в том числе и под мобильные устройства, роль которых с каждым днем все увеличивается. По умолчанию используется база данных *Microsoft SQL Server* и сервер приложений *Microsoft Internet Information Services 6.0*. Клиентская же часть ИПС требует наличия только *Microsoft Internet Explorer 5.5* и выше, входящего в состав дистрибутива операционных систем семейства *Windows*. Отсутствие необходимости установки специального программного обеспечения на клиентские компьютеры исключает проблему обновления версий и связанные с этим затраты средств и времени — все необходимые изменения вносятся на серверной части ИПС, которая отличается возможностью саморазвития. Данный аспект выгодно отличает систему от более "тяжеловесных" аналогов справочных систем.

Помимо гипертекстовых ссылок, система поддерживает добавление в ответы файлов любого типа (*doc, xls, pdf, dwg, avi* и др.), что позволяет обогатить ответы мультимедийной информацией и использовать для представления информации формат, наиболее соответствующий типу данных. За счет поддержки привязки уникального алгоритма обработки для каждого запроса или

его шаблона данная ПОИС обладает возможностями универсального применения и гибкой интеграции с внешними Интернет-системами. При необходимости ПОИС может использовать разные тематические БД, обеспечивая при этом возможность слияния двух разных тематических баз, а также разделение по заданному критерию имеющейся базы на несколько тематических.

Данная система имеет много общего с базами знаний, системами поддержки принятия решений, экспертными и поисковыми системами с использованием семантической концепции. Отличительным преимуществом ПОИС является наличие обратной связи с пользователем, которая позволяет, "увидев" список предложенных пользователями или виртуальными агентами запросов, выдать блок необходимой информации. В качестве основы для представления материалов в системе "Генон" используется язык HTML, возможности которого позволяют представить любую информацию в удобном для восприятия виде. За счет поддержки привязки уникального алгоритма обработки для каждого шаблона запроса ПОИС обладает свойствами универсального применения и гибкой интеграции с внешними системами.

Тысячи авторов из России и стран СНГ ежедневно пишут информационные шаблоны в рамках системы "Генон". Особо стоит отметить использование концепции RDF (*resource description framework* — инфраструктура описания ресурсов), предложенной организацией *World Wide Web Consortium (W3C)*. RDF — это универсальный способ разложения любых знаний на маленькие блоки. Он задает определенные семантические смысловые правила. При этом одним простым способом можно описать любой факт так, чтобы его могли обрабатывать компьютерные программы. Система "Генон" интуитивно понятна и проста в использовании, что делает эту систему доступным инструментом, помогающим

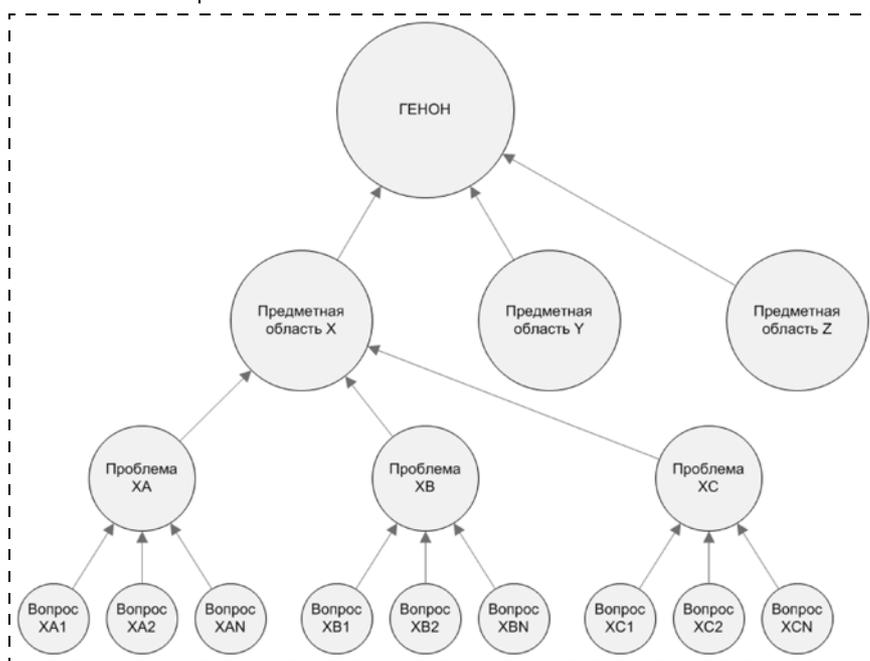


Рис. 7. Внутреннее представление информации и тематик в рамках системы "Генон"

рационально структурировать имеющиеся знания и находить интересующую информацию быстро и удобно (рис. 7). На базе семантических принципов, заложенных в системе "Генон", можно реализовать множество бизнес-процессов, выполняемых в открытой РПС, и организовать полноценное ЕИП для эффективного взаимодействия во внутренней и внешней средах ВП.

Современные тенденции развития систем удаленного управления станочными комплексами предполагают использование открытых систем ЧПУ на основе базовой архитектуры открытых систем OSI. Существует целый ряд проектов для их системных реализаций на базе наиболее распространенных сетевых протоколов информационных взаимодействий.

Следует отметить, что применение сложных взаимодействий и обеспечения интеграции между разнородными программными системами не всегда обязательно. Реально удаленное управление технологическими объектами (ввод программ обработки, их пуск, визуализацию функционирования, автоматизацию измерений параметров и диагностики) можно вести гораздо проще на основе типовых протоколов Интернет ТСР/ІР при наличии в блоках ЧПУ современных ІВМ-совместимых процессоров и сетевых адаптеров (сетевых карт). При этом внутри каждого предприятия рекомендуется внедрить динамические БД, характеризующих состояние производства на данный момент времени и наличие свободных ресурсов.

Московский государственный открытый университет (МГОУ) и ОАО "КП" ("Красный Пролетарий") осуществляют внедрение комплексных виртуальных технологий в машиностроении. Специалисты завода осуществляют разработку компьютерных программ изготовления изделий наномеханики на ГПМ с ЧПУ типа МК6523Ф4, МК6510Ф; МК7702-04 производства ОАО "КП" с четырьмя и пятью управляемыми координатами в среде EdgeCAM CALS/ІПИ-технологий. Механическая обработка предусмотрена в режиме удаленного сетевого управления ГНТМ. Внедряются элементы контроля производственных процессов с использованием Интернет в режиме реального времени [11].

## Заключение

При такой постановке задачи за счет комплексного внедрения ІКТ обеспечивается сокращение времени создания наукоемких изделий не менее, чем в 2—3 раза, а длительность производственных циклов с учетом ТехПП за счет нахождения наиболее рациональных производственных решений и свободных ресурсов в быстро реконфигурируемой РПС сокращается не менее, чем в 5—10 раз. За счет перераспределения заказов увеличиваются ритмичность и серийность производства, производительность труда. Коэффициент загрузки оборудования возрастает до 0,92—0,95. Информационные взаимодействия в условиях РПС интенсифицируются в десятки раз и становятся неотъемлемой частью комплексных маркетинговых, производственных, технологических и организацион-

но-финансовых процессов. Значительно интенсифицируется производство новой наукоемкой продукции.

Использование методологии ГНТМ, РПС, ВП, МАС и СИПС позволит привлечь к реализации проекта десятки передовых машиностроительных предприятий на базе расширенного гипертехнологического множества. Унифицированное построение данной нанотехнологической продукции на основе компьютерного управления электронными структурами и конфигурациями изделий (ЭСКИ) позволяет быстро создать несколько сот ГНТМ для различных методов обработки применительно к запросам потребителей. Длительность производственных циклов будет сокращена не менее чем в 5 раз, а технологическая себестоимость на 15—25 %.

Корпорация Роснанотех получит новые методы создания нанотехнологической продукции с непосредственным переходом на их серийное производство, а также наиболее современные типы реализации бизнес-проектов производственно-технического назначения с гарантированным достижением позитивных конечных результатов. Использование изложенных принципов управления и информатизации позволяет создать эффективные ВП, а на их основе новые экономически и функционально эффективные гибкие реконфигурируемые производственные системы на наиболее современном уровне. Такие методы производства, безусловно, должны занять определяющее положение в Российской Федерации.

## Список литературы

1. Ветров С. И., Ковшов А. Н., Скворцов А. В., Чмырь Д. А., Скворцова Д. А. Виртуальная распределенная производственная система нанотехнологий. Тезисы доклада международной конференции по нанотехнологиям. М.: МГОУ, 2009.
2. Скворцов А. В., Соколов Д. М. Технологическая подготовка к применению современных программных продуктов PLM // Технология машиностроения. 2009. № 3. С. 51—57.
3. Скворцов А. В. Система автоматизации проектирования интегрированных технологических процессов в машиностроении // Вестник машиностроения. 2004. № 12. С. 34—39.
4. ГОСТ 2.053—2006. Единая система конструкторской документации. Электронная структура изделия.
5. ГОСТ Р ІСО 10303-44—2002. Интегрированные обобщенные ресурсы. Конфигурация структуры изделия.
6. Скворцов А. В., Чмырь Д. А., Скворцова Д. А. Управление электронными структурами изделий (ГОСТ Р 2.053—2006) с использованием MS SQL Server Enterprise Manager // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2009. № 5.
7. Скворцова Д. А., Скворцов А. В. Принципы создания гибких производственных систем автоматизированной сборки // Проблема машиностроения и надежности машин. 2006. № 1. С. 52—59.
8. Капустин Н. М., Кузнецов П. М., Дьяконова Н. П. Комплексная автоматизация в машиностроении: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Под ред. Н. М. Капустина. — М.: Академия, 2005. — 368 с.
9. Чмырь Д. А. Моделирование технологических процессов с использованием генетических алгоритмов оптимизации // Вестник информационных и компьютерных технологий. № 6. С. 32—35.
10. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 2-е изд. — СПб.: Питер, 2005. 864 с.
11. Скворцов А. В., Соколов Д. М. Компьютерный анализ качества и точности производственных процессов в режиме реального времени с использованием VISUAL SPC // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. № 7. С. 25—30.

**А. А. Кондрашин**, канд. техн. наук, проф.,  
**В. В. Слепцов**, д-р техн. наук, проф.,  
**А. Н. Лямин**, ст. преподаватель,  
 ГОУ ВПО "МАТИ" — Российский  
 государственный технологический университет  
 им. К. Э. Циолковского, e-mail:alcond@rambler.ru

## ФОРМИРОВАНИЕ ЦВЕТНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИМИ СВЕТОДИОДАМИ

*Представлен анализ основных типов органических светодиодов (OLED и PLED), базовые принципы работы и основные преимущества в сравнении с технологиями LCD, PD и LED. Проведено сравнение технологий формирования цветного изображения в органических светодиодах, их преимущества и недостатки. Указаны ближайшие научно-технические задачи, решение которых необходимо для скорейшего внедрения органических светодиодов в различные сферы хозяйственной деятельности человека.*

**Ключевые слова:** органические светодиоды, технология OLED, технология PLED, формирование цветного изображения, перспективы развития.

### Введение

Практическая реализация технологии производства твердотельных источников света LED (*Light Emitting Diodes*) стала возможной лишь в конце 70—80 гг. XX века и основывалась исключительно на неорганических материалах, например, GaAsP, GaP, AlGaAs и т. д. [1].

В наши дни перспективными считаются лишь несколько технологий получения светоизлучающих структур: InGaAlP, GaN на подложке из карбида кремния SiC и InGaN на сапфире, на монокристаллическом кремнии и карбиде кремния SiC [2]. Основными недостатками данных структур являются:

- достаточно высокое энергопотребление, что уменьшает возможность использования данных структур в мобильных устройствах;
- низкая ударопрочность;
- относительно невысокие показатели яркости и контрастности средств отображения информации (СОИ);
- большое время отклика ( $\geq 8$  мс).

Поэтому все возрастающие потребности промышленности, военных, коммерческих и бытовых структур как во всевозможных СОИ, так и в источниках света, вынуждает производителей продолжать активно вести разработки над улучшением существующих технологий.

В настоящее время работы над органическим светодиодом ведутся параллельно по нескольким направлениям:

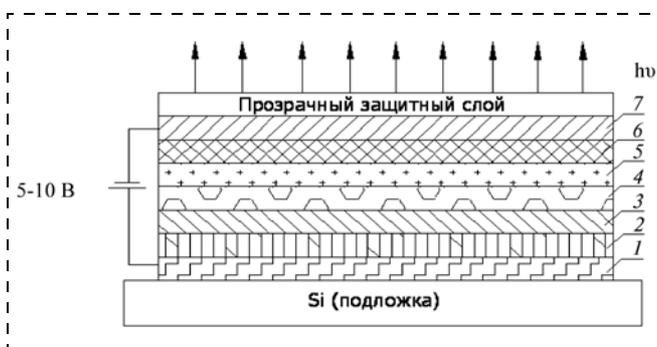
- по технологии OLED (*Organic Light Emitting Diodes*) или Small-Molecule OLED-SMOLED, разработанной, например, компаниями *Eastman Kodak* [3] или компанией *eMagin* [4] и использующей низкомолекулярные органические вещества;
- по технологии PLED (*Polymer Light Emitting Diodes*) или LEP (*Light Emitting Polymer*), разработанной, например, компаниями *Cambridge Display Technology* CDT [5] или компанией MED, и использующей светоизлучающие полимеры, которые являются разновидностью сопряженных полимеров.

### 1. Основные принципы получения органических светодиодов

Основное различие в приведенных технологиях заключается в методах нанесения и свойствах многослойных структур светоизлучающих материалов, определяющих параметры работы различных устройств (эффективность и ресурс работы устройства; контрастность, цветопередача и разрешение СОИ, габаритные размеры изделий и т. п.).

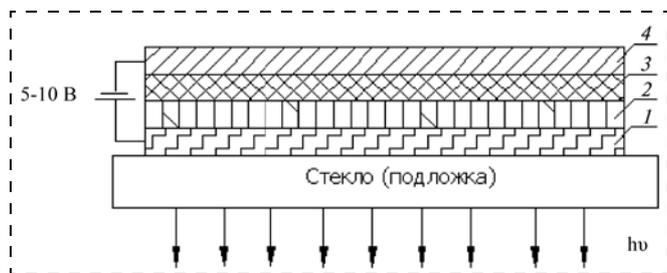
Для осаждения слоев материалов по технологии OLED используется метод вакуумно-термического испарения (VTE) (*vacuum thermal evaporation*). Например, металл с высокой энергией выхода (рис. 1) осаждается на КМОП-подложку в качестве анода 1. Тонкий слой 2 (HIL — *hole injection layer*) обеспечивает инжекцию дырок через низкий энергетический барьер (менее 5 эВ). Затем на него осаждается слой 3, служащий для транспортировки дырок (HTL — *hole transport layer*). Поверх него формируется слой эмиттера 4 (EML — *emissive layer*). Слои 5 и 6 обеспечивают транспортировку (ETL — *electron transport layer*) и инжектирование электронов (EIL — *electron injection layer*), соответственно. Слой 7 является катодом. Требуемый цвет обеспечивается за счет применения цветных фильтров.

Для осаждения слоев материалов по технологии PLED полимерные материалы растворяют в органическом растворителе, а затем наносят в жидком виде



**Рис. 1. Структурная схема OLED на кремниевой подложке:**

1 — пленка анода (например, ITO, Indium-Tin Oxide — индий-оксид олова SnO); 2 — слой инжектирования дырок; 3 — слой транспортировки дырок; 4 — слой эмиссионного материала; 5 — слой транспортировки электронов; 6 — слой инжектирования электронов; 7 — пленка катода (инжектор электронов)



**Рис. 2. Структурная схема PLED на стеклянной подложке:**  
 1 — пленка анода, например In—SnO (индий—оксид олова);  
 2 — слой инжектирования дырок; 3 — слой инжектирования электронов; 4 — пленка катода (инжектор электронов, например, Ва, Са, Al)

Таблица 1

**Достоинства и недостатки материалов, используемых в органических светодиодах на начало 2009 г.**

Цвет	Низкомолекулярный материал — OLED		Высокомолекулярный (полимерный) материал — PLED	
	Эффективность, кд/А	Ресурс работы, ч (при яркости 150 кд/м <sup>2</sup> )	Эффективность, кд/А	Ресурс работы, ч (при яркости 150 кд/м <sup>2</sup> )
Красный	1...2	50 000 [6]	4...5	40 000
Зеленый	8...10	200 000 [7]	8...9	>40 000
Синий	4	14 000	3	10 000
Желтый	8...10	>30 000	8	>30 000
Белый	2...4	100 000 [8]	6...8	20 000

с помощью специального струйного "принтера". Структура PLED представлена на рис. 2.

На прозрачную гибкую подложку наносят пленку анода 1 и затем полимерную пленку 2, являющуюся источником инжектирования дырок HIL (*hole injection layer*). Далее осаждают слой 3, являющийся инжектором электронов EIL (*electron injection layer*) с более низким положением дна зоны проводимости. Толщина и электрические характеристики материалов подобраны так, чтобы электроны и дырки из соответствующих слоев собирались вдоль границы контакта слоев, где и происходит их рекомбинация с генерацией фотонов. Слой 4 является катодом.

В табл. 1 представлены некоторые сравнительные характеристики OLED-и PLED-структур. Из таблицы видно, что в настоящее время OLED-структуры превосходят PLED-структуры по сумме параметров свечения. Однако OLED-технология, в отличие от PLED-технологии, не позволяет создавать дисплеи больших размеров [9].

## 2. Типы OLED-структур

В настоящее время существует несколько типов OLED-структур:

- **пассивно-матричные (ПМ) (Passive-Matrix OLED, PMOLED)**. Элементы изображения (пиксели) представляет собой диодные структуры. Для генерации излучения необходима подача тока как

на строку, так и на столбец матрицы. На базе PMOLED выполняются устройства малых размеров (2—3") отображения информации на сотовых телефонах, карманных компьютерах и MP3-плеерах со сроком службы не более 5 000 ч непрерывной работы. Однако PMOLED не пригодны для создания экранов с большой диагональю и высоким разрешением;

- **активно-матричные (АМ) (Active-Matrix OLED, AMOLED)** — аналог пассивно-матричных структур, но в отличие от первого типа пиксель состоит из диода и тонкопленочного полевого транзистора (TFT), являющегося переключателем, который контролирует количество энергии, поступающей к диоду. Меньшая, чем у пассивно-матричных диодов потребляемая мощность и более высокая частота обновления данных позволяет использовать AMOLED для создания больших ТВ-экранов, дисплеев портативных устройств, мониторов, электронных информационных и рекламных табло;
- **OLED-структуры с прозрачным катодом** или прозрачные диоды (*transparent OLED, TOLED*). Ими могут быть как PMOLED-структуры, так и AMOLED-структуры. Прозрачные органические светодиоды на тонких прозрачных стеклянных или пластмассовых подложках позволяют генерировать излучение оптического диапазона как верхней и нижней, так и обеими торцевыми поверхностями. В нерабочем режиме панели прозрачны. TOLED могут монтироваться на стеклах очков, наשלемных дисплеях, на лобовом стекле автомобиля, самолета и т. д.;
- **наборные OLED-структуры (stacked OLED, SOLED)**. Особенностью формирования структур данных светодиодных структур является вертикальное расположение субпикселей. Данная структура OLED, благодаря независимой регулировке интенсивности излучения цветопередачи и шкалы серого позволяет создавать полноцветные экраны с высоким разрешением;
- **гибкие OLED-структуры (foldable-flexible OLED — FOLED)** могут формироваться как на гибкой металлической фольге, так и на поверхности пластмасс. Дисплеи на гибких OLED могут быть включены в ткань одежды для спасательных служб и военных. При подаче фоновое изображения (стены здания, рельефа местности и т. д.) на специальную одежду человек сливается с фоном и становится "невидимым";
- **фосфоресцирующие OLED-структуры (phosphorescent OLED, — PHOLED)**, разработанные компанией Universal Display Corp (UDC). В данных структурах слои транспортировки дырок и электронов выполнены на основе растворимого в полимере фосфоресцирующего низкомолекулярного материала. Благодаря фосфоресценции, PHOLED теоретически могут преобразовывать практически 100 % потребляемой энергии в све-

товое излучение (в отличие от 23 % для обычных органических светодиодов), что приводит к значительному уменьшению потребляемой мощности, сокращению тепловых потерь и, соответственно, к получению матриц больших размеров. PHOLED также пригодны для изготовления AMOLED с TFT на поли- или аморфном кремнии. Слои формируются на подложке с помощью процесса струйной печати органическим паром (Organic Vapor Phase Deposition, OVPD) — пары органического материала пропускают через микроскопические сопла, формирующие коллимированный пучок газа, создающий на подложке требуемый рисунок. На базе технологий PHOLED и TOLED разрабатываются окна, которые в зависимости от погодных условий и освещенности могут либо самостоятельно испускать дневной свет, либо его пропускать.

По последним рейтингам продаж 2008 г. объемы реализации AMOLED значительно превзошли PMOLED. В настоящее время в этой области деятельности лидируют две компании — Samsung SDI, выпускающая дисплеи для мобильных телефонов и SONY, осваивающая производство телевизоров.

Фирма SONY выпускает единственный серийный телевизор Sony XEL-1-11" с разрешением 960 × 540 пикселей и контрастностью экрана около 1 000 000 : 1 при мощности потребления всего 25 Вт, что заметно ниже аналогичных показателей ЖКИ моделей. Толщина матрицы составляет около 3 мм. В ближайшее время планируется выход в продажу OLED-телевизора с экраном 21", продемонстрированный на выставке электроники в Лас-Вегасе CES (Consumer Electronics Show) (CES) в январе 2009 г.

В середине 2008 года на выставке электроники CeBIT-2008 компания Samsung продемонстрировала OLED-дисплей с диагональю 31" и толщиной 4,3 мм, поступление в продажу которых планируется осуществить уже к середине 2009 г.

### 3. Получение цветного изображения в OLED

В настоящее время наиболее перспективными считаются три технологии получения цветного изображения в OLED:

- с отдельными RGB-эмиттерами;
- с белыми эмиттерами и цветными фильтрами (WOLED + CF);
- конвертирования спектра CCM (*color changing media*).

**Технология с отдельными RGB-эмиттерами.** Получение цветного изображения в целом аналогично технологии генерации RGB в ЭЛТ: три органических материала излучают свет базовых (основных) цветов R, G и B, которые смешиваются с помощью оптической системы-линзы. Основным отличием данной технологии является способ формирования потока электронов в тонкопленочных структурах (рис. 3, а).

Основным достоинством данного метода является наличие отработанной ИТО-технологии с высокой эффективностью использования энергии.

Основными недостатками данного метода являются:

- подбор необходимых материалов, излучающих цвет нужной длины волны и с одинаковой яркостью;
- различная скорость старения эмиттеров в связи с неравномерным отводом теплоты от краев и центра матрицы. В результате их свечения в процессе старения по-разному изменяется суммарная цветовая температура и цвета "плывут".

**Технология с белыми эмиттерами и цветными фильтрами.** Излучение трех одинаковых белых эмиттеров проходит через цветные фильтры (рис 3, б), т. е. данный метод использует технологию ЖК-дисплеев, при котором не требуется формирования отдельных по цветам эмиттеров.

Основным достоинством данного метода является однородное старение эмиттеров.

Основными недостатками данного метода являются:

- относительно низкая эффективность использования мощности, так как часть излученного эмиттерами света поглощается в фильтрах;
- необходимость высокой эффективности излучения белых эмиттеров;
- необходимость напыления ИТО на цветные фильтры.

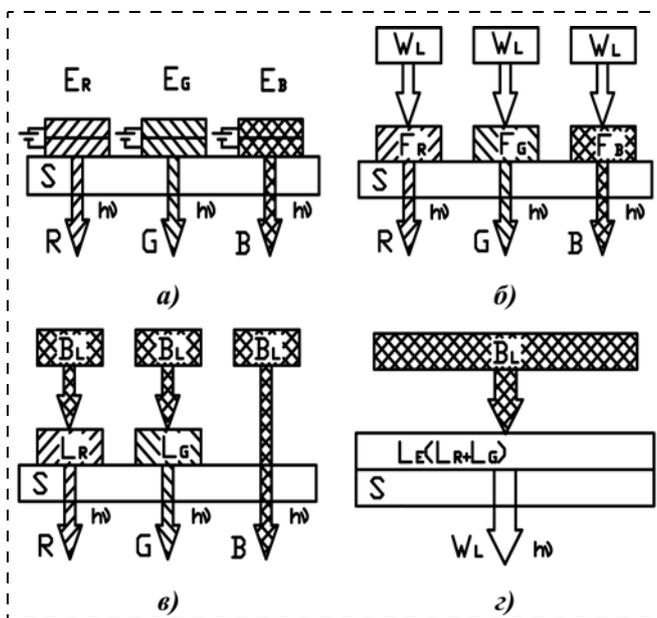


Рис. 3. Схемы формирования цвета в OLED: а — схема с отдельными цветными эмиттерами; б — схема с цветными фильтрами; в — схема с конверсией коротковолнового излучения с разделенными люминофорами; г — схема с конверсией коротковолнового излучения с общим люминофором; R, G, B — основные цвета;  $E_R, E_G, E_B$  — соответствующие эмиттеры;  $F_R, F_G, F_B$  — соответствующие световые фильтры;  $L_R, L_G$  — соответствующие световые люминофоры;  $L_E$  — многослойный люминофор; S — прозрачная подложка (substrate);  $W_L$  и  $B_L$  — источники белого и синего света соответственно

**Прогнозируемые перспективы развития технологии органических светодиодов [11]**

Показатели		2007 г.	2009 г.	2012 г.	2015 г.
Светоотдача образцов устройств, лм/Вт	лабораторных	44	76	150	189
	коммерческих	н/д*	34	76	150
Стоимость устройства, долл./лм		н/д	0,072	0,027	0,010
Наработка на отказ, ×1000 ч		н/д	11	25	40
* — н/д (нет данных).					

**Технология конвертирования спектра ССМ.** В настоящее время белые RGB-матрицы используются в многоцветных табло, дисплеях наружной рекламы, системах освещения транспортных средств, наружной подсветки зданий и ландшафта, подсветки портативных ЖКИ-приборов и др. Таким образом, светодиоды становятся конкурентами флуоресцентных осветительных ламп.

Проблема конвертирования спектра в настоящее время в основном решается применением двух технологий [10].

1. Коротковолновое излучение "синего" эмиттера (или УФ-излучения) (рис. 3, в) преобразуется в два более длинноволновых излучения (красное и зеленое). Излучение "синего" эмиттера проходит "напрямую".

Основными достоинствами данного метода являются:

- отсутствие формирования трех (раздельных по цветам) эмиттеров;
- достаточно высокое использование энергии излучателей;
- однородное старение эмиттеров.

2. Тонкопленочный люминофор желтого или зеленого + красного цвета наносит непосредственно на синий светодиод (рис. 3, г). В результате два или три излучения смешиваются, образуя белый или близкий к белому цвет.

Основными достоинствами данного метода являются:

- невысокая стоимость изделий;
- оттенок белого цвета задается в процессе производства самих светодиодов.

Основные недостатки обеих технологий конвертирования следующие:

- меньшая (по сравнению с RGB-матрицами) светоотдача вследствие преобразования света в слое люминофора;
- необходимость стабильности излучения "синего" эмиттера;
- скорость старения люминофора больше скорости старения синего светодиода;
- необходимость напыления ИТО на ССМ.

#### 4. Преимущества и недостатки OLED/PLED-технологий по сравнению с технологиями LCD, PD, LED

##### Преимущества OLED/PLED-технологий:

- возможность изготовления гибких матриц светодиодов;
- малое время отклика (10 мкс);
- малая толщина устройств со светодиодными матрицами;
- достаточно высокая вибропрочность и ударопрочность;
- высокий КПД, низкое напряжение питания и низкая потребляемая мощность матрицы;

- возможность в широких пределах изменять светоотдачу устройств;
- достаточно высокое разрешение и яркость. Размер пикселей может составлять 5 мкм при яркости свечения от нескольких единиц и до более 100 000 кд/м<sup>2</sup>;
- высокая контрастность изображения (1 000 000 : 1), обеспечивающая формирование изображения при ярком освещении (более 1000 лк);
- широкий рабочий температурный диапазон (-50...+70 °С).

Прогнозируемые перспективы развития технологии органических светодиодов приведены в табл. 2.

Теоретически возможная эффективность 360 лм/Вт.

##### Недостатки OLED/PLED-технологий

- Для OLED-экранов важно влияние излучения соседних включенных пикселей, имеющих максимальную яркость, на находящийся в центре выключенный "черный" пиксель. В этом случае контраст определяет степень паразитного излучения от соседних пикселей. Для повышения контраста необходимо сформировать оптическую изоляцию между пикселями, которая приводит к сужению диаграммы излучения эмиттеров и к сужению рабочих углов OLED-экрана до 150...160°.
- Для стабильной работы органических светодиодов необходимо обеспечивать защиту структур от окружающей среды (кислорода, влажности и т. п.).
- Цветопередача достигается подбором определенных композитных материалов, выбор которых весьма ограничен. Для выравнивания спектра в основной светоэмиссионный материал добавляют дополнительные фосфорные и люминесцентные вещества, свойства которых быстро ухудшаются со временем, причем особенно сильно под действием яркого света и высокой температуры.
- Наблюдается деградация параметров полимеров, что приводит к уменьшению яркости при заданном напряжении питания.

- В цветowych дисплеях деградация цветowych компонентов происходит крайне неравномерно, что вызывает нарушение цветowego баланса.
- Несмотря на отсутствие подсветки у OLED- и PLED-экранов некоторые малоформатные ЖК-дисплеи вместе с узлом задней подсветки имеют меньшую толщину, чем некоторые OLED-экраны.
- В настоящее время затраты на производство OLED-экранов выше, чем у ЖК-дисплеев вследствие низкого выхода годных и высокой стоимости материалов.

## 5. Перспективы производства органических светодиодов в России

Исследования органических светодиодов в России проводятся рядом научно-исследовательских институтов и организаций.

Специалистами НИИ "Волга" совместно с ОАО "Ангстрем" и НП "Поли-Эл" (г. Зеленоград) ведутся работы по созданию видеомодулей из органических полупроводниковых материалов как на основе OLED- [12], так и PLED-технологий [13]. При этом материалы пленочных покрытий наносятся на подложку как методом вакуумного напыления, так и разрабатываются двухслойные структуры на основе полимерных материалов, наносимых методом центрифугирования.

В ОАО "НИИМЭ и Микрон" (г. Зеленоград) разработаны полимерные светодиодные панели с размером рабочего поля до  $100 \times 100$  мм, разрешением до  $388 \times 268$  пикселей и яркостью  $1900$  кд/м<sup>2</sup>.

В НИИФП им. Ф. В. Лукина (г. Зеленоград) разработаны органические светодиоды, излучающие во всем диапазоне видимого спектра. Яркость светодиодов в зависимости от длины волны излучения составляет от 100 до 400 кд/м<sup>2</sup>. Ведутся работы по формированию органических светодиодов на лавсане и по объединенной технологии подложек на аморфном кремнии или поликремнии с технологией OLED.

ОАО ЦНИИ "Циклон" совместно с ИФХ им. А. Н. Фрумкина РАН и Институтом проблем физической химии разработали опытные образцы светодиодов и мини-дисплеев с разрешением  $8 \times 8$  и  $128 \times 64$  пикселей. Достигнуты яркости излучения: зеленого —  $341$  кд/м<sup>2</sup>, белого  $100...400$  кд/м<sup>2</sup>, синего  $253$  кд/м<sup>2</sup> и красного  $63$  кд/м<sup>2</sup> с эффективностью свечения  $6$  лм/Вт при долговечности  $5000$  ч.

### Проблемы производства отечественных органических светодиодов:

- отсутствие отечественного специализированного технологического оборудования для производства органических светодиодов;
- большинство необходимых органических материалов класса ОСЧ (за исключением прозрачных анодов и катодов) в РФ не производятся;

- отсутствие в РФ производства TFT-матриц на стекле;
- нет единых производственных стандартов;
- отсутствие необходимого числа высококвалифицированных специалистов.

### Ближайшие научно-технические задачи:

- серийное освоение нанотехнологии с высоким процентом выхода годных изделий и доведения ресурса работы дисплеев минимум до 5 тыс. ч непрерывной работы при высоких уровнях яркости;
- повышение эффективности свечения до  $76$  лм/Вт [14];
- разработка новых долговечных композиционных органических материалов в качестве тонкопленочных слоев светоизлучающих структур;
- улучшение защиты внутренних слоев от воздуха и влаги (корпусная и бескорпусная герметизация);
- увеличение площади и яркости светящихся поверхностей;
- создание эффективных управляющих электронных подсистем.

### Список литературы

1. Широков Ю. Оптика для твердотельных источников света // Современная электроника. № 6. 2005. С. 6—8.
2. Полещук А. Вопросы выбора мощных светодиодных ламп для светотехнических применений // Современная электроника. № 1. 2006. С. 20—23.
3. Tang C. W., VanSlyke S. A. Organic electroluminescent diodes // Appl. Phys. Lett. 1987. 51. 913.
4. Самарин А. OLED-микродисплеи фирмы eMagin // Современная электроника. 2006. № 1. С. 28—32.
5. Cambridge Display Technology Ltd // CDT. 2004.
6. [http://www.oledinfo.com/lifetime/ciba\\_develops\\_long\\_lifetime\\_phosphorescent\\_material\\_for\\_novaled\\_s\\_oled\\_technology](http://www.oledinfo.com/lifetime/ciba_develops_long_lifetime_phosphorescent_material_for_novaled_s_oled_technology) (Данные программы развития светодиодной отрасли. Департамент энергетики США).
7. [http://www.olinfo.com/lifetime/novaled\\_achieving\\_record\\_green\\_pin\\_phosphorescent\\_oled\\_lifetimes\\_and\\_lowest\\_driving\\_voltage](http://www.olinfo.com/lifetime/novaled_achieving_record_green_pin_phosphorescent_oled_lifetimes_and_lowest_driving_voltage) (Данные программы развития светодиодной отрасли. Департамент энергетики США).
8. [http://www.oledinfo.com/lifetime/novaled\\_reaches\\_100\\_000h\\_lifetime\\_for\\_a\\_highly\\_efficient\\_white\\_oled](http://www.oledinfo.com/lifetime/novaled_reaches_100_000h_lifetime_for_a_highly_efficient_white_oled) (Данные программы развития светодиодной отрасли. Департамент энергетики США).
9. Майская В. Органические светодиоды // Электроника. 2007. № 5. С. 39—46.
10. Шурыгина В. Твердотельные осветительные устройства. Прощайте, старые, добрые светильники // Электроника. 2008. № 5. С. 88—97.
11. [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl\\_mypp2008\\_web.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2008_web.pdf) (Данные программы развития светодиодной отрасли. Департамент энергетики США).
12. Абаньшин Н., Горфинкель Б., Жуков Н. и др. Плоскопанельные дисплеи на органических светоизлучающих структурах // Электронные компоненты. 2005. № 10. С. 57—59.
13. Залогин И. Дисплеи на полимерных светодиодах // Электронные компоненты. 2005. № 10. С. 61—63.
14. Иванов С. Рынок плоских дисплеев: современное состояние и перспективы // Электроника. 2008. № 5. С. 98—107.

УДК 621.373.826: 621.375.8

**М. Е. Белкин**, д-р техн. наук, зав. науч. лаб.,  
**Л. М. Белкин**, аспирант,  
Московский государственный институт  
радиотехники, электроники и автоматики  
(технический университет), МИРЭА,  
e-mail: belkin@mirea.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ МНОГОКАНАЛЬНОГО АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА СВЧ ДИАПАЗОНА

*Описываются принципы и особенности экспериментального исследования параметров лазерного излучателя в целях оценки качества передачи с помощью такого излучателя многоканального аналогового сигнала СВЧ диапазона. Приводятся методика и результаты исследования характеристик отношения сигнал/шум, относительного шума интенсивности и отношения сигнал/помеха комбинационной частоты, подтверждающие эффективность применения разработанного лазерного излучателя с произведением средней мощности на полосу модуляции более  $300 \text{ мВт} \cdot \text{ГГц}$  для передачи многоканального аналогового сигнала с полосой модуляции до  $10 \text{ ГГц}$ .*

**Ключевые слова:** лазерный излучатель, характеристики передачи многоканального аналогового сигнала СВЧ диапазона, волоконно-оптические системы.

### Введение

Как известно, современный этап волоконно-оптической техники характеризуется не только интенсивным развитием сверхскоростных цифровых волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) магистрального и локального назначений [1]. Важной составляющей технического прогресса локальных телекоммуникационных сетей также являются аналоговые ВОСП. В частности, в настоящее время многоканальные аналоговые ВОСП с частот-

ным разделением каналов (ЧРК) на поднесущих ВЧ и СВЧ диапазонов занимают в информационно развитых странах достаточно обширную нишу в мультисервисных сетях абонентского доступа [2]. Также перспективной областью применения аналоговых ВОСП являются активно исследуемые в последние годы локальные системы распределения волоконно-эфирной структуры [3], внедрение которых открывает дорогу для мультисервисной персональной связи. Еще одно важное направление развития аналоговых ВОСП относится к радиолокационным системам СВЧ диапазона [4], где они могут эффективно использоваться в различных трактах многоэлементных фазированных антенных решеток.

Основная особенность принципиального элемента ВОСП — полупроводникового лазерного излучателя (ПЛИ) для вышеперечисленных локальных применений — заключается в необходимости одновременного увеличения как средней выходной оптической мощности  $P_0$  (для увеличения числа точек распределения), так и быстродействия или полосы модуляции  $\Delta F$  (для увеличения пропускной способности линии). При этом на первый план выступает такой целевой показатель, как произведение  $P_0 \cdot \Delta F$  [5]. Для исследования путей его увеличения была проведена разработка ПЛИ с произведением средней мощности на полосу модуляции более  $300 \text{ мВт} \cdot \text{ГГц}$ , результаты которой описаны в [6].

В условиях постоянно растущей конкуренции важным требованием в ходе проектирования аппаратуры современных ВОСП является возможность корректной оценки эффективности применения конкретного лазерного излучателя в реальной передающей аппаратуре еще на этапе выбора компонентной базы, что приведет к существенной экономии временных и трудовых затрат на разработку. Такой подход и результаты исследования ПЛИ применительно к аппаратуре сверхскоростных цифровых ВОСП телекоммуникационного назначения представлены в [7]. В данной статье предлагается подход и приводятся результаты исследования ПЛИ в целях оценки эффективности его

применения для передачи многоканального сигнала на поднесущих СВЧ диапазона в современных и перспективных аналоговых ВОСП телекоммуникационного и радиолокационного назначения.

### Требования к полупроводниковому лазерному излучателю в современных аналоговых и цифровых ВОСП

Проведем краткое сравнение аналоговых и цифровых ВОСП с точки зрения схемотехнических требований к применяемому в них ПЛИ. Общей современной тенденцией развития систем обоих классов является увеличение пропускной способности, что в цифровой ВОСП реализуется с помощью временного разделения каналов (ВРК), а в аналоговой — с помощью ЧРК. Исходя из известных принципов формирования вышеуказанных типов канального уплотнения в радиоэлектронной аппаратуре можно сделать вывод, что общим для цифровых и аналоговых ВОСП будет требование к максимизации верхней частоты модуляции ПЛИ. Отметим, однако, что оно вызвано разными причинами. В цифровой ВОСП — это увеличение тактовой частоты кода в линейном тракте, а в аналоговой — верхней частоты комплексного модулирующего сигнала в полосе поднесущих.

Отсюда вытекает различие требований к частотно-модуляционной характеристике (ЧМХ) ПЛИ для цифровых и аналоговых ВОСП. Если в первых с шириной полосы модуляции, близкой к 100 % от тактовой частоты, помимо соответствия требуемой тактовой частоте должна учитываться неравномерность ЧМХ в полосе модуляции [7], то во вторых, с типичной относительной шириной полосы пропускания 5—10 %, данная неравномерность не оказывает существенного влияния. Однако аналоговые ВОСП характеризуются повышенными требованиями к минимизации вносимых шумов и нелинейных искажений, основным источником которых считается исследуемый ПЛИ [2]. В частности, при рассмотрении отношения сигнал/шум

(ОСШ) помимо стандартных тепловых шумов необходимо дополнительно учитывать влияние так называемого относительного шума интенсивности (RIN), источником которого является спонтанное излучение ПЛИ. Кроме того, одновременная передача в многоканальной системе с ЧРК большого числа поднесущих предъявляет высокие требования к минимизации интермодуляционных искажений (ИМИ), источниками которых являются нелинейность энергетической характеристики ПЛИ и неравномерность его ЧМХ в области пика так называемого электрон-фотонного резонанса [2]. Влияние первого источника компенсируется за счет оптимального выбора рабочей точки и глубины модуляции, второго — за счет уменьшения данного пика либо применения ПЛИ с более широкой полосой ЧМХ так, чтобы значение верхней частоты полосы модуляции ВОСП не превышало 0,7—0,8 от верхней частоты ЧМХ используемого ПЛИ.

Таким образом, особенность оценки эффективности применения ПЛИ для передачи многоканального аналогового сигнала СВЧ диапазона заключается в необходимости корректного исследования в рабочей полосе аналоговой ВОСП RIN излучателя и связанного с ним отношения сигнал/шум, а также вносимых ИМИ.

### Методика исследования характеристик передачи аналоговых СВЧ сигналов

Основной целью настоящего экспериментального исследования является обоснование эффективности применения разработанных излучателей в современных и перспективных аналоговых волоконно-оптических системах телекоммуникационного и радиолокационного назначения. Для достижения поставленной цели исследуются два наиболее важных показателя качества аналоговой системы передачи: отношение сигнал/шум и отношение сигнал/помеха (ОСП) комбинационной частоты. С помощью первого показателя оценивается влияние RIN разработанного лазерного излучателя, ко-

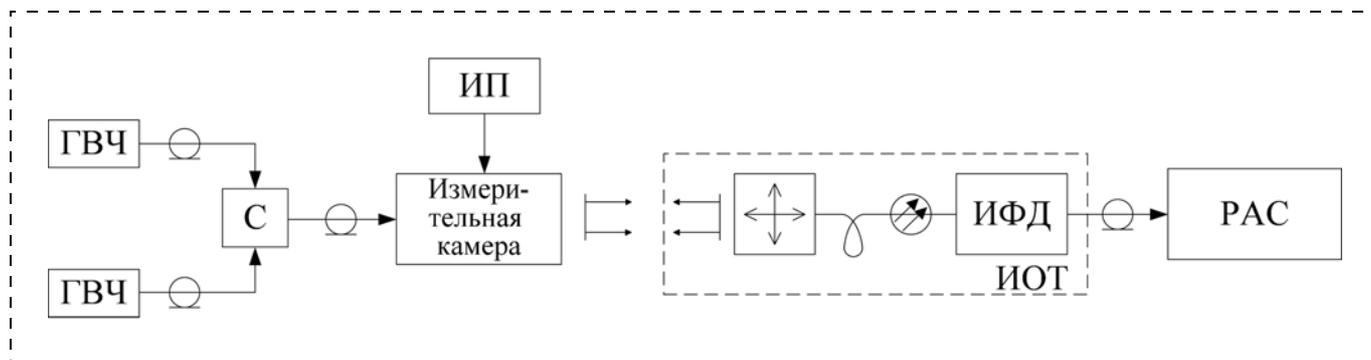


Рис. 1. Общая структурная схема измерений (ИП — источник питания)

торый желательно исследовать отдельно, с помощью второго — линейность его характеристики электрооптического преобразования в режиме большого сигнала, которая стандартно определяется путем измерения интермодуляционных искажений третьего порядка передаваемых СВЧ сигналов. Измерения должны быть проведены в ряде относительно узких частотных полос, соответствующих рабочим диапазонам современных СВЧ систем передачи.

Общая структурная схема измерения всех трех вышеуказанных характеристик представлена на рис. 1. Как следует из рисунка, ее принципиальными элементами являются: источники СВЧ сигналов, измерительная камера, в которую устанавливается испытуемый образец лазерного излучателя, измерительный оптический тракт (ИОТ) и регистратор СВЧ сигналов.

Структурная схема ИОТ, а также требования, структура и принципы проектирования измерительной камеры аналогичны примененным для передачи сверхвысокоскоростного цифрового сигнала и описаны в [6]. В качестве источника сигнала на входе измерительной камеры используются стандартные генераторы высокой частоты (ГВЧ): один при измерении отношения сигнал/шум либо два, объединенных с помощью пассивного СВЧ сумматора (С) с достаточным уровнем развязки, при измерении ИМИ. Основными техническими требованиями к данным ГВЧ являются соответствие рабочего диапазона частот прибора полосе модуляции исследуемого ПЛИ, выходная мощность должна быть не менее 10 мВт, уровень амплитудного шума не более  $-170$  дБ/Гц на расстоянии 10 кГц от несущей. В качестве регистратора уровней сигнала и шума на выходе входящего в состав ИОТ измерительного фотодиода (ИФД) с известными параметрами используется радиочастотный анализатор спектра (РАС). Основными техническими требованиями к данному РАС являются: соответствие рабочего диапазона частот прибора полосе модуляции исследуемого лазерного излучателя, чувствительность в любой точке рабочего диапазона должна быть не более  $-90$  дБм, динамический диапазон не менее 60 дБ, точность измерения уровня не более 0,5 дБ.

Измерение характеристики отношения сигнал/шум проводится стандартным методом [8] при подаче на вход измерительной камеры сигнала от ГВЧ и регистрации уровня выходного СВЧ сигнала либо уровня шума на выходе ИФД с помощью РАС. Отметим, что для корректного измерения параметров ПЛИ необходим специальный электронный блок управления (не показан на рис. 1), который описан в [6].

Основные функции данного блока заключаются в следующем:

- обеспечение нестабильности выходной мощности ПЛИ в пределах 1 %;
- обеспечение нестабильности температуры ПЛИ в пределах  $0,1$  °С в любой точке заданного температурного интервала;
- обеспечение требуемого напряжения питания ИФД с пульсациями не более 1 %.

Как было сказано выше, при разработке аналоговых ВОСП с ВЧ и СВЧ поднесущими также требуется иметь достоверную информацию об уровне RIN лазерного излучателя, на который оказывают значительное влияние отражения в линейном волоконно-оптическом тракте [2]. В данном случае она необходима для определения вклада RIN ПЛИ в величину ОСШ на выходе ИОТ. Отличие от описанной выше методики измерения отношения сигнал/шум состоит в замене источника СВЧ сигнала на входе измерительной камеры на согласованную нагрузку. Отметим, что для измерения шума между ИФД и РАС (рис. 1) требуется включать малошумящий СВЧ усилитель (МШУ) с соответствующей полосой пропускания. Основные требования к усилителю: коэффициент усиления не менее 45 дБ, коэффициент шума не более 3 дБ. Методика измерения RIN состоит в следующем. Прежде всего с помощью вольтметра постоянного тока (не показан на рис. 1) измеряется постоянное напряжение  $V_{\text{пост}}$  на нагрузке ИФД, равной 50 Ом. По методике, изложенной в руководстве по эксплуатации РАС, измеряется среднеквадратическое напряжение шума  $V_{\text{шум}}$  на рабочих частотах модуляции аналоговой ВОСП. Данные измерений приводятся к полосе 1 Гц и пересчитываются к выходу ПЛИ с учетом потерь в ИОТ и коэффициента усиления МШУ. Уровень RIN определяется как  $RIN = 20 \lg(V_{\text{шум}}/V_{\text{пост}})$ .

Как известно [2], уровень RIN ПЛИ в значительной степени определяется уровнем отражений в оптическом измерительном тракте, и, чтобы оптические отражения практически не влияли на шум излучателя, их значение не должно превышать  $-55...-60$  дБ. Для устранения влияния оптических отражений от элементов ИОТ в процессе его настройки необходимо осуществлять скашивание торцов так, чтобы отражения не попали в резонатор исследуемого ПЛИ, использовать для связи с фотодиодом оптический разъем типа FC/APC с собственным уровнем отражений менее  $-70$  дБ и ИФД с просветленной поверхностью фоточувствительного окна. Тем не менее, в ходе исследований целесообразно оценить связь отражений и RIN испытуемого ПЛИ. Для этого в схеме рис. 1 между отрезком одномодового волокна ИОТ и ИФД вводится волоконно-оптический циркулятор, к до-

полнительному плечу которого подключаются калиброванные меры оптического отражения. Основные требования к циркулятору: прямые потери не более 1 дБ, развязка не менее 40 дБ, обратные потери не менее 50 дБ.

Интермодуляционные искажения, оказывающие наибольшее влияние третьего ( $2f_1 - f_2$ ,  $2f_2 - f_1$ ) порядка, измеряются стандартным методом двух генераторов [8] при подведении на вход измерительной камеры сигналов одинаковой мощности от двух развязанных посредством стандартного СВЧ сумматора (С) ГВЧ с разномом частот 50 МГц и регистрации основных несущих и продуктов интермодуляции с помощью того же РАС.

### Проведение лабораторных испытаний

Для подтверждения корректности описанных выше методик и оценки эффективности применения разработанного ПЛИ для передачи многоканального СВЧ сигнала были проведены измерения характеристик ОСШ и ОСП комбинационной частоты третьего порядка. Кроме того, для оценки вклада шумов лазера в величину отношения сигнал/шум определены частотная характеристика RIN испытуемого ПЛИ и зависимость уровня его RIN от величины отражений в оптическом тракте.

Для проведения испытаний была создана измерительная установка по схеме рис. 1. Согласно изложенным в предыдущем разделе требованиям в ней в качестве источников СВЧ сигналов использовались генератор ВЧ и СВЧ сигналов Agilent 8341В (рабочий диапазон 10 МГц...20 ГГц) и блок генерации векторного анализатора цепей Agilent E8363В (рабочий диапазон 50 МГц...40 ГГц), в качестве регистратора СВЧ сигналов — анализатор спектра Tektronix RSA6114А (рабочий диапазон 9 кГц...14 ГГц). Для сложения сигналов ГВЧ применялся пассивный 3-дБ СВЧ сумматор с волновым сопротивлением 50 Ом (из комплекта Agilent 8341В). В качестве ИФД в составе ИОТ использовался  $p-i-n$  фотодиод типа New Focus 1414 с полосой пропускания 25 ГГц. Для повышения чувствительности анализатора спектра после ИФД применялись два малозумящих СВЧ усилителя с полосами пропускания 1...8 ГГц и 8...12 ГГц. Введение обратных оптических отражений осуществлялось посредством четырехплечного волоконно-оптического циркулятора Ascentta CIR-P4 с прямыми потерями менее 0,8 дБ и изоляцией соседних плеч более 50 дБ.

В ходе испытаний значения ОСШ и ОСП измерялись в трех частотных полосах в районе 1 ГГц, 5 ГГц и 10 ГГц. Перед началом измерений в каждой указанной выше полосе проводилась калибровка измерительной установки при замене в схеме рис. 1 измерительной камеры и ИОТ на экви-

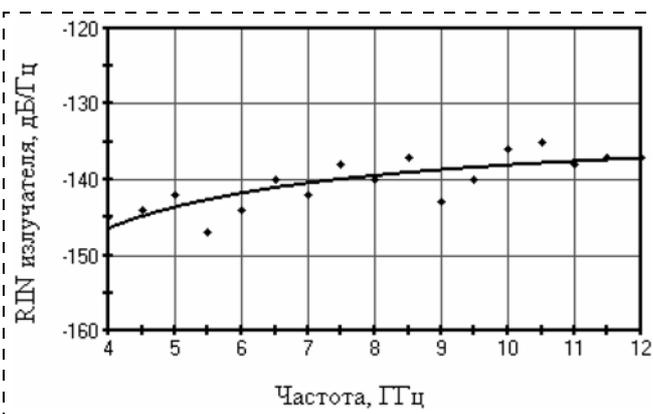


Рис. 2. Частотная характеристика RIN лазерного излучателя



Рис. 3. Зависимость шумов лазерного излучателя от уровня оптических отражений

валентный СВЧ аттенуатор, ослабление которого равно потерям при электрооптическом и оптико-электрическом преобразованиях в соответствующей частотной полосе и затуханию в оптическом тракте (порядка 50 дБ). Критерии калибровки соответствуют значениям ОСШ не менее 70 дБ и ОСП не менее 55 дБ.

Результаты измерения частотной характеристики RIN испытуемого ПЛИ представлены на рис. 2. Как следует из рисунка, значения RIN во второй и третьей полосах измерений составляют соответственно  $-143$  дБ/Гц и  $-138$  дБ/Гц, т. е. наблюдается устойчивая тенденция к его увеличению с ростом модулирующей частоты, что согласуется с известными результатами [2].

Измеренная на базе описанной выше методики зависимость RIN от уровня оптических отражений представлена на рис. 3.

Как следует из рисунка, даже при значении RIN лазерного модуля  $-138$  дБ/Гц уровень оптических отражений составляет примерно  $-53$  дБ. Из данных рис. 2 и 3 можно сделать два важных вывода:

- малое значение уровня оптических отражений свидетельствует о корректности настройки

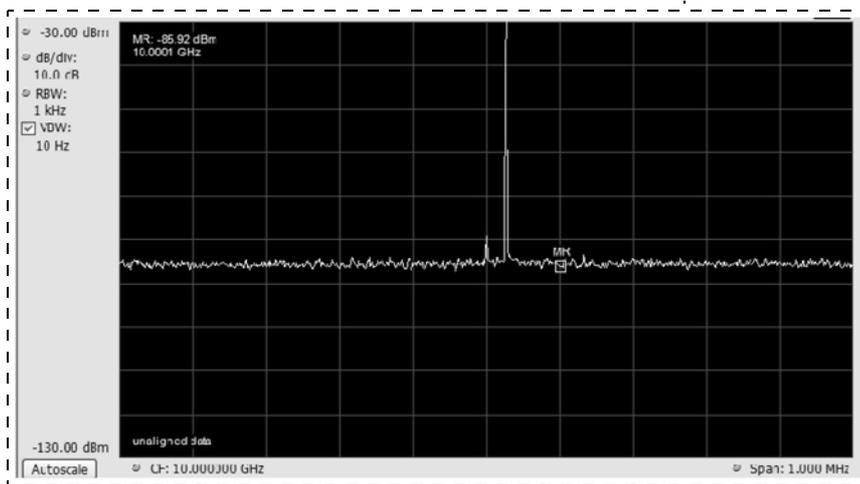


Рис. 4. Спектрограмма при модуляции испытуемого ПЛИ аналоговым СВЧ сигналом диапазона 10 ГГц

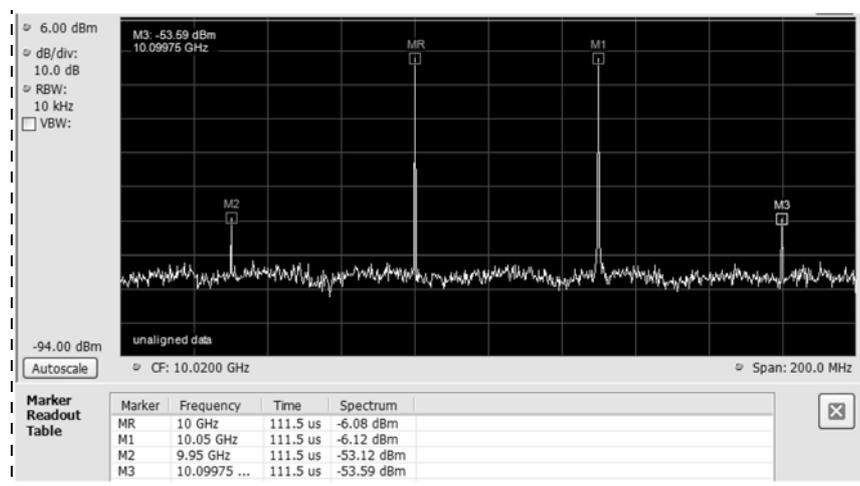


Рис. 5. Спектрограмма при модуляции испытуемого ПЛИ двумя аналоговыми СВЧ сигналами диапазона 10 ГГц

при передаче СВЧ сигналов диапазона 10 ГГц с помощью описанной выше измерительной установки представлен на рис. 5.

### Оценка результатов исследований

В связи с тем, что в настоящее время для аналоговых ВОСП СВЧ диапазона пока отсутствует специализированная отечественная и зарубежная нормативная техническая документация, оценка результатов наших испытаний проводилась путем сравнения с существующими аналогами.

Для этого был проведен поиск в сети Интернет, предметом которого была продукция фирм, производящих специализированные лазерные модули для аналоговых ВОСП СВЧ диапазона. В результате была обнаружена одна отечественная фирма ООО НПФ "Дилаз" [10] и три зарубежных предприятия. При детальном рассмотрении продукции фирмы "Дилаз" было выявлено, что в паспортных данных выпускаемого лазерного модуля ДМПО131-23 необходимые параметры отсутствуют. Среди зарубежных производителей наилучшими параметрами на сегодняшний день обладает продукция фирмы MITEQ, США [11]. Среди

выпускаемых лазерных модулей был отобран аналог серии SCMT-100M11G, наиболее близкий к разработанному лазерному излучателю по рабочей полосе модулирующих частот. Его основные параметры представлены ниже:

- Полоса модулирующих частот, ГГц. . . . . 0,1...11
- Неравномерность ЧМХ, дБ. . . . . 3
- Коэффициент шума, NF, дБ. . . . . 18 (типичный)
- Входная мощность, соответствующая точке пересечения 3-го порядка ПРЗ,  $S_{in}$ , дБм . . . . . -4

Сложность сопоставления заключается в том, что последние два параметра, приведенные в спецификации иностранного производителя, не соответствуют измеренным в ходе наших исследований. Однако она может быть преодолена путем простого анализа, а также использования известных аналитических выражений.

ИОТ в измерительной установке и, следовательно, достоверности результатов измерений;

- применяя известную методику расчета [9], можно определить, что RIN разработанного излучателя даже в районе 10 ГГц вызывает ухудшение отношения сигнал/шум не более 1 дБ.

Измерения ОСШ в полосе 1 кГц для всех трех частотных полос показали, что типичные значения ОСШ в диапазоне 1 ГГц составляют 58 дБ и уменьшаются до 56 дБ в диапазоне 10 ГГц. Пример результатов измерения спектра при передаче аналогового СВЧ сигнала диапазона 10 ГГц с помощью описанной выше измерительной установки представлен на рис. 4.

Измерения ОСП для всех трех частотных полос при подаче на СВЧ вход измерительной камеры двух сигналов одинаковой амплитуды с разностью частот 50 МГц показали, что типичные значения ОСП комбинационной частоты третьего порядка во всех трех диапазонах составляют 47—50 дБ. Пример результатов измерения спектра

В частности, коэффициент шума, по определению, представляет собой ОСШ на входе и выходе устройства. В нашем случае его с достаточной точностью можно считать равным разности (в дБ) ОСШ, полученному при калибровке измерительной установки, и ОСШ, полученному в ходе измерений. Значение ОСШ при калибровке составило 70 дБ, а значение ОСШ при измерениях в диапазоне 10 ГГц получилось 56 дБ (см. рис. 4). То есть, коэффициент шума составляет 14 дБ. Кроме того, входная мощность в дБм, соответствующая точке пересечения 3-го порядка ПРЗ в дБ [12]:

$$S_{in} = \text{ПРЗ} - \text{ОСП}/2. \quad (1)$$

Точка пересечения в аналоговой ВОСП определяется по результатам измерений на основе известной методики [13] и соответствует 22 дБм. Измеренное значение ОСП согласно рис. 5 составляет 48 дБм. Тогда из (1)  $S_{in} = -2$  дБм.

По результатам оценки можно сделать вывод, что исследованный лазерный излучатель обеспечивает качество передачи реальных СВЧ сигналов на уровне лучших современных лазерных модулей иностранного производства, специально предназначенных для передачи аналоговых СВЧ сигналов [11], что свидетельствует об эффективности его применения в современных и перспективных аналоговых волоконно-оптических системах телекоммуникационного и радиолокационного назначения.

## Заключение

В статье предложен экспериментальный подход, обеспечивающий возможность корректной оценки эффективности применения лазерного излучателя в реальной передающей аппаратуре многоканальной аналоговой волоконно-оптической системы передачи еще на этапе выбора компонентной базы, что приводит к существенной экономии временных и трудовых затрат на разработку. Описаны методики измерения отношения сигнал/шум и отношения сигнал/помеха комбинационной частоты и приведены результаты исследования лазерного излучателя с полосой модуляции до 10 ГГц, подтверждающие их корректность и эффективность применения исследуемо-

го излучателя для передачи многоканального сигнала на поднесущих СВЧ диапазона в современных и перспективных аналоговых ВОСП телекоммуникационного и радиолокационного назначения.

*Настоящая работа выполнена в рамках программы "Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2010 годы)" Министерства образования и науки РФ.*

*Автор выражает благодарность д-ру техн. наук, профессору М. Г. Васильеву за предоставление образцов лазерных излучателей для проведения испытаний.*

## Список литературы

1. O'Mahony M. J. e. a. Future optical networks. IEEE // OSA Journal of Lightwave Technology. 2006. V. 24. N 12. P. 4684—4696.
2. Белкин М. Е. Аналоговые волоконно-оптические системы с частотным разделением каналов на ВЧ и СВЧ поднесущих и сети на их основе // Автореферат дис. докт. техн. наук. М.: МИРЭА, 2007. 36 с.
3. Niïho T., Nakaso M., Masuda K. e. a. Transmission performance of multichannel wireless LAN system based on radio-over-fiber techniques // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2006. MTT-54. № 2. Part 2. P. 980—989.
4. Parker D., Zimmermann D. C. Phased Arrays. Parts 1, 2 // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. MTT-50. № 3. P. 678—698.
5. Белкин М. Е., Васильев М. Г., Засовин Э. А. Аналитическое исследование лазерного излучателя для комбинированных систем радиолокации и связи СВЧ диапазона // Радиотехника. 2008. № 1. С. 71—77.
6. Белкин М. Е., Васильев М. Г. Полупроводниковые лазерные излучатели с высоким произведением средней мощности на полосу модуляции // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 9. С. 23—33.
7. Белкин М. Е. Исследование эффективности применения полупроводникового лазерного излучателя для передачи сверхвысокоскоростного цифрового сигнала // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 9. С. 36—42.
8. ГОСТ 9783—88. Аппаратура электронная бытовая. Методы электрических высокочастотных измерений.
9. Белкин М. Е. Отношение сигнал/шум в аналоговой волоконно-оптической системе с ВЧ и СВЧ поднесущими // Электросвязь. 2005. № 8. С. 36—38.
10. [www.dilas.ru](http://www.dilas.ru).
11. [www.miteq.com](http://www.miteq.com).
12. A system designer's guide to RF and microwave fiber optics // ORTEL Corporation. 1994. 32 p.
13. Белкин М. Е. Метод расчета числа передаваемых каналов в многоканальной волоконно-оптической системе с ВЧ и СВЧ поднесущими // Радиотехника. 2006. № 12. С. 88—91.

**Е. М. Белозубов**, канд. техн. наук,  
**Н. Е. Белозубова**, инженер,  
 ОАО "НИИ физических измерений", г. Пенза,  
 e-mail: niifi@sura.ru

## ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ИДЕНТИЧНЫМИ ТЕНЗОЭЛЕМЕНТАМИ И МЕМБРАНАМИ, ИМЕЮЩИМИ ЖЕСТКИЙ ЦЕНТР

*Рассмотрены тонкопленочные тензорезисторные микроэлектромеханические системы (ТТМЭМС) с идентичными тензоэлементами и мембранами, имеющими жесткий центр. Показаны преимущества и новые возможности таких ТТМЭМС при воздействии нестационарных температур.*

**Ключевые слова:** тонкопленочные тензорезисторные МЭМС (ТТМЭМС), идентичные тензоэлементы, нестационарная температура.

Использование тензорезисторов, выполненных в виде идентичных тензоэлементов, соединенных низкоомными перемычками, для построения тонкопленочных тензорезисторных микроэлектромеханических систем (ТТМЭМС) в сочетании с мембранами, имеющими жесткий центр, открывает новые возможности для совершенствования систем. Рассмотрим особенности конкретных реализаций ТТМЭМС с идентичными тензоэлементами и мембраной, имеющей жесткий центр. При этом будем руководствоваться классификацией, предложенной в работе [1], которая, по мнению авторов, достаточно корректно отражает особенности построения ТТМЭМС и в то же время открыта для совершенствования.

### ТТМЭМС с идентичными тензоэлементами и асимметричными каналами

Рассматриваемый ТТМЭМС содержит мембрану 1 (рис. 1, а) с утолщенным периферийным участком 2 и жестким центром 3, измерительный мост 4 (рис. 1, в), каждое плечо которого образовано последовательным соединением низкоомных перемычек 5 (рис. 1, б), равномерно расположенных на поверхности мембраны по радиальным направлениям тензоэлементов 6. Каждое плечо дополнительного измерительного моста 7 (рис. 1, в) образовано последовательным соединением низкоомных перемычек 8, равномерно расположенных на

поверхности мембраны по тангенциальным направлениям тензоэлементов 9 (рис. 1, б). Тензоэлементы обоих мостов выполнены в виде идентичных квадратов. Две противолежащие стороны квадрата расположены параллельно радиусам мембраны, проведенным через центры соответствующего квадрата. Тензорезисторы с помощью контактных площадок 10 соединены с выводами 11 корпуса (рис. 1, а). Тензоструктура изолирована от мембраны с помощью диэлектрической пленки 12 [2].

При подаче давления тензоэлементы тензорезисторов  $R_1$  и  $R_3$  подвергнутся воздействию сжимающих радиальных деформаций, направленных вдоль длины тензоэлемента. В результате этого воздействия сопротивления тензорезисторов  $R_1$  и  $R_3$ , уменьшатся. Вследствие воздействия растягивающих радиальных деформаций, направленных вдоль длины тензоэлементов, сопротивления тензоэлементов тензорезисторов  $R_2$  и  $R_4$  увеличиваются. В результате воздействия сжимающих радиальных деформаций, направленных перпендикулярно длине тензоэлементов, сопротивления тензорезисторов  $R_6$ , и  $R_8$  увеличиваются. В силу воздействия растягивающих радиальных деформаций, направленных перпендикулярно длине тензоэлементов, сопротивления тензорезисторов  $R_5$ ,  $R_7$  уменьшаются.

При воздействии тангенциальных деформаций происходят аналогичные процессы. Выходные сигналы измерительных мостов 4 и 7 (рис. 1, в) усиливаются соответственно дифференциальными усилителями 13 и 14. На выходе дифференциального усилителя 15 появляется сигнал, пропорциональный разности сигналов с измерительных мостов 4 и 7. Если датчик находится в стационарных температурных условиях, т. е. когда температура мембраны одинакова, то в связи с тем, что тензорезисторы образованы идентичными элементами, разность сигналов с измерительных мостов равна нулю. На выходе дифференциального усилителя 16 появляется сигнал, пропорциональный сумме сигналов измерительных мостов, так как сигнал с дополнительного измерительного моста инвертируется инвертором 17 с коэффициентом усиления 1.

Под воздействием нестационарной температуры температура границы раздела мембраны и жесткого центра отличается от температуры границы раздела мембраны и периферийного основания. При этом функция изменения сопротивлений тензорезисторов от разницы температур на мембране у одного из измерительных мостов аналогична функции изменения сопротивлений при увеличении давления, а у другого измерительного моста противоположна изменению сопротивлений этих

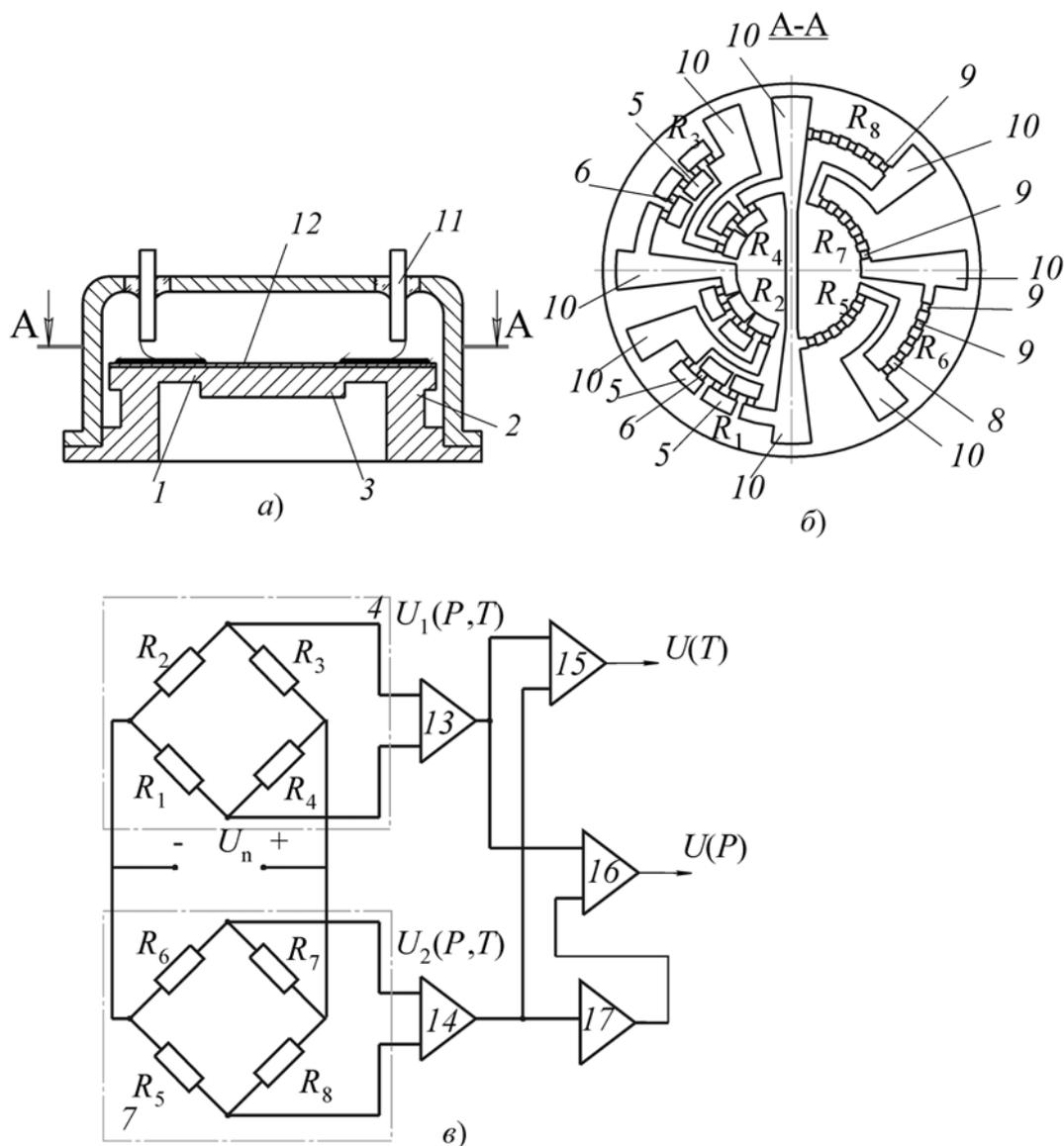


Рис. 1. ТТМЭМС с идентичными тензоэлементами и асимметричными каналами

тензорезисторов от увеличения давления. Аналогичное соотношение изменений наблюдается между изменениями сопротивлений тензорезисторов от термодформаций, возникающих в результате неравномерности температур на мембране, в связи с тем, что характер изменения термодформаций совпадает с характером изменения температур на мембране.

Так как размеры тензорезисторов в измерительном и дополнительном мосте идентичны, и они попарно находятся на одинаковом расстоянии от центра мембраны изменения сопротивлений тензорезисторов обоих тензомостов по модулю как от изменения давления, так и от изменения температуры будут соответственно равны. Вследствие раз-

личного изменения (по знаку) сопротивлений тензорезисторов от давления и разницы температур и в связи с одинаковым значением (по модулю) изменения сопротивлений тензорезисторов от давления и изменения температуры в измерительном и дополнительном мостах на выходе дифференциального усилителя 15 образуется сигнал, пропорциональный разности температур (так как термодформации тоже характеризуют эту разность) на мембране. При этом на выходе дифференциального усилителя 16 появляется сигнал, пропорциональный удвоенному значению давления, измеренному каждым измерительным мостом.

Таким образом, преимуществом ТТМЭМС является повышение точности в условиях воздейст-

вия нестационарной температуры за счет возможности учета неравномерности температур и термодеформаций в зоне размещения тензоэлементов. Другим преимуществом является повышение чувствительности за счет суммирования выходных сигналов измерительного и дополнительного тензомостов. Преимуществом ТТМЭМС является также расширение функциональных возможностей за счет получения с одной системы информации о давлении и о распределении температуры на мембране, которая характеризует скорость изменения нестационарной температуры измеряемой среды. Кроме того, преимуществом решения является возможность раздельного снятия информации о давлении с тензомостов [2].

### ТТМЭМС с идентичными тензоэлементами в виде секторов колец

Такой ТТМЭМС (рис. 2) содержит деформируемую часть мембраны 1, выполненную за одно целое с жестким центром 2 и утолщенным периферийным участком 3. На поверхности мембраны размещен измерительный мост из окружных тензоэлементов 4–7 и радиальных тензоэлементов 8–11. Контактные площадки 12–15 служат для подключения измерительного моста к источнику питания и регистратору, а контактные площадки 16 — для соединения тензоэлементов [3].

При увеличении давления сопротивления тензоэлементов 4, 6, 8, 10 увеличиваются, тензоэлементов 5, 7, 9, 11 — уменьшаются. В силу того, что тензоэлементы 4, 6, 8, 10 и 5, 7, 9, 11 включены в противоположные плечи мостовой схемы при подключении к контактам 13 и 15 источника питания, а к контактам 12 и 14 — регистратора, на нем по-

является выходной сигнал, пропорциональный давлению.

При действии термоудара температура на тензоэлементах, прилегающих к жесткому центру, отличается от температуры на тензоэлементах, прилегающих к утолщенному периферийному участку. Результирующие изменения сопротивлений тензорезисторов плеч моста, расположенных между контактами 12 и 13, 13 и 14, 14 и 15, 15 и 12, имеют практически одинаковое значение в силу того, что каждое плечо состоит из тензоэлементов, прилегающих к жесткому центру и утолщенному периферийному участку. Поэтому выходной сигнал не зависит от разницы температур на жестком центре и периферийном утолщенном участке.

Для минимизации влияния нестационарной температуры необходимо обеспечить равенство сопротивлений всех тензоэлементов. В предложенной конструкции четыре типа тензоэлементов, различающихся размерами, которые определяются углами между радиусами, образующими тензоэлементы  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ . Значения сопротивлений каждого из тензоэлементов, расположенных между радиусами углов  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ , соответственно равны [4]

$$R_{\theta_1} = \frac{\rho L}{\theta_1 r_2}; R_{\theta_2} = \frac{\rho \theta_2}{\ln \frac{r_1 + 0,5L}{r_1 - 0,5L}};$$

$$R_{\theta_3} = \frac{\rho L}{\theta_3 r_1}; R_{\theta_4} = \frac{\rho \theta_4}{\ln \frac{r_2 + 0,5L}{r_2 - 0,5L}}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — удельное поверхностное сопротивление тензоэлемента.

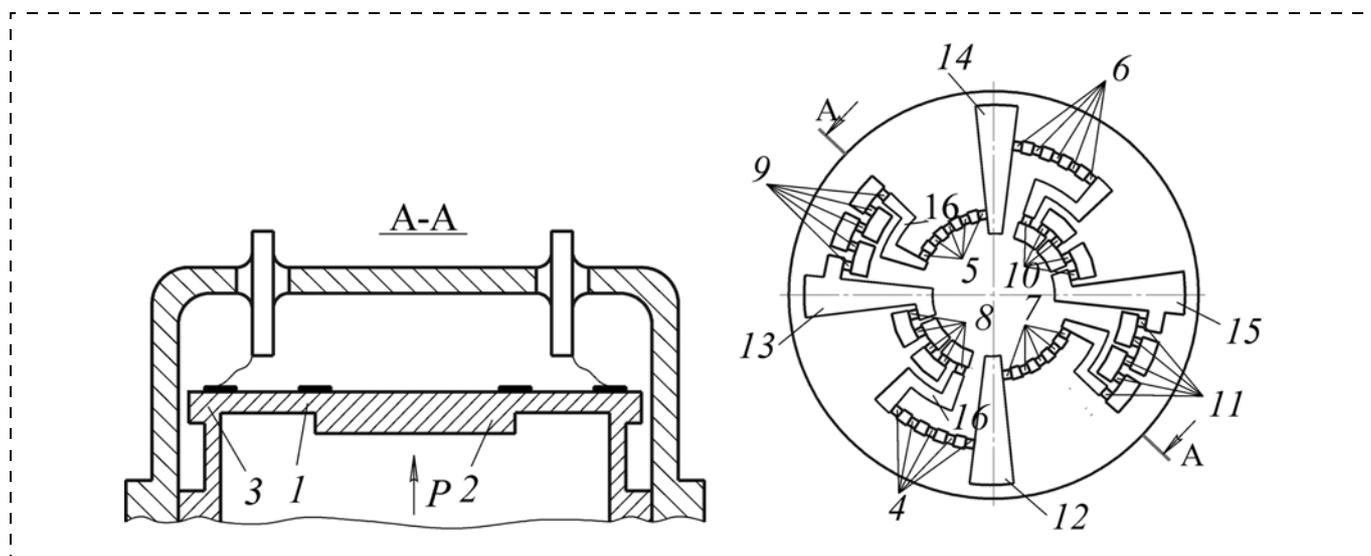


Рис. 2. ТТМЭМС с идентичными тензоэлементами в виде секторов колец

Проведя необходимые преобразования [3], получаем

$$\begin{aligned} \theta_1 &= 2\text{rccsin} \frac{W}{2(r_2 - 0,5L)}; \\ \theta_2 &= \frac{L}{2r_2 \text{arcsin} \frac{W}{2(r_2 - 0,5L)}} \ln \frac{r_1 + 0,5L}{r_1 - 0,5L}; \\ \theta_3 &= \frac{r_2}{r_3} 2\text{arcsin} \frac{W}{2(r_2 - 0,5L)}; \\ \theta_4 &= \frac{L}{2r_2 \text{arcsin} \frac{W}{2(r_2 - 0,5L)}} \ln \frac{r_2 + 0,5L}{r_2 - 0,5L}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $W$  — расстояние между концами внутренней стороны тензоэлемента, расположенного по периметру жесткого центра;  $\theta_1$  — угол между боковыми радиальными сторонами радиального тензоэлемента, расположенного по периметру жесткого центра;  $\theta_2$  — угол между боковыми радиальными сторонами окружного тензоэлемента, расположенного по периферии мембраны;  $\theta_3$  — угол между боковыми радиальными сторонами радиального тензоэлемента, расположенного по периметру мембраны;  $\theta_4$  — угол между боковыми радиальными сторонами окружного тензоэлемента, расположенного по периметру жесткого центра [3].

### ТТМЭМС с идентичными тензоэлементами и симметричными каналами

Целью создания такого ТТМЭМС является повышение точности при воздействии нестационарной температуры измеряемой среды, повышение чувствительности и информативности за счет попарного размещения противоположно включенных плеч измерительного моста в зонах различных температур при термоударе и попарного размещения двух соседних плеч в зонах одинаковых температур при термоударе, расположения тензоэлементов в зонах максимального изменения деформаций и за счет возможности получения с одного датчика удвоенной информации о давлении.

ТТМЭМС (рис. 3) содержит мембрану 1 с утолщенным периферийным участком 2 и жестким центром 3, измерительный мост 4, каждое плечо которого образовано последовательным соединением тензоэлементов 6 низкоомными перемычками 5, равномерно расположенными на поверхности мембраны. Тензоэлементы двух соседних плеч моста ( $R_1, R_2$ ) расположены по радиальным направлениям. Тензоэлементы двух других соседних плеч моста ( $R_3$  и  $R_4$ ) расположены по тангенциальным направлениям. Все тензоэлементы обоих мостов выполнены в виде идентичных квадратов [5].

В ТТМЭМС центры тензоэлементов одних плеч, образованных радиальными тензоэлементами ( $R_1$ ) и тангенциальными элементами ( $R_4$ ), размещены на границе раздела мембраны и периферийного участка. Центры тензоэлементов других

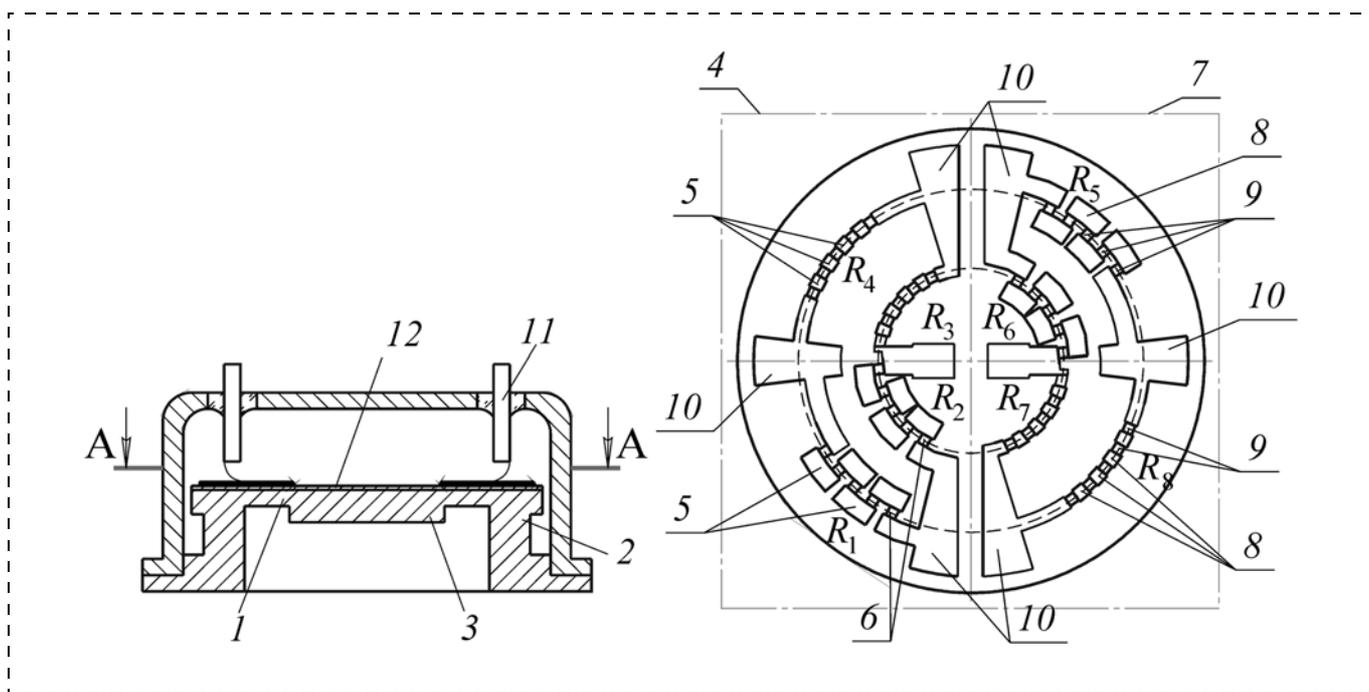


Рис. 3. ТТМЭМС с идентичными тензоэлементами и симметричными каналами

плеч ( $R_2$  и  $R_3$ ) размещены на границе раздела мембраны и жесткого центра. Тензорезисторы с помощью контактных площадок  $10$  соединены с выводами  $11$  корпуса. Тензосхема расположена на диэлектрической пленке  $12$ . Элементы дополнительного моста (тензоэлементы, низкоомные переключки, контактные площадки) расположены симметрично элементам измерительного моста относительно центра мембраны.

При воздействии давления вследствие суммирования изменений сопротивлений тензорезисторов от радиальных и тангенциальных деформаций, аналогично изложенному ранее, сопротивления тензорезисторов  $R_1$ ,  $R_3$  уменьшаются, а тензорезисторов  $R_2$ ,  $R_4$  увеличиваются. В силу центральной симметрии в тензорезисторах  $R_5$ — $R_8$  произойдут аналогичные процессы. Изменения сопротивлений тензорезисторов  $R_1$ — $R_4$ ,  $R_5$ — $R_8$  отдельными измерительными мостами преобразуются в выходной сигнал. При воздействии нестационарной температуры измеряемой среды вследствие нахождения соседних плеч мостовой схемы в одинаковых

температурных условиях по аналогии с ранее рассмотренными решениями выходной сигнал не будет зависеть от нестационарной температуры измеряемой среды.

Таким образом, выполнение тензорезисторов в виде идентичных тензоэлементов при сочетании с мембранами, имеющими жесткий центр, позволяет расширить функциональные возможности ТТМЭМС при воздействии нестационарных температур.

#### Список литературы

1. Белозубов Е. М., Белозубова Н. Н., Васильев В. А. Тонкопленочные микромеханические системы и датчики на их основе // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 2. С. 33—39.
2. Белозубов Е. М. Патент РФ № 1675702, 5G01L 9/04. Датчик давления. Оpubл. 07.09.91 Бюл. № 33.
3. Белозубов Е. М., Зиновьев В. А. Патент РФ 1712802 5G01L 9/04. Датчик давления. Оpubл. 15.02.92 Бюл. № 6.
4. Овечкин Ю. А. Микроэлектроника. М.: Радио и связь, 1982. 187 с.
5. Белозубов Е. М. Патент РФ № 1744530, 5G01L 9/04. Датчик давления. Оpubл. 30.06.92. Бюл. № 24.

УДК 621.318.12

**Ю. В. Гуляев**<sup>1</sup> — акад., директор,  
**Б. С. Лобанов**<sup>2</sup> — ген. директор,  
**А. Ю. Митягин**<sup>1</sup> — проф., д-р физ.-мат. наук,  
гл. науч. сотр.,  
**М. В. Фесенко**<sup>2</sup> — зам. нач. отд.,  
**Б. В. Хлопов**<sup>2</sup> — канд. техн. наук, нач. отд.,  
<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники РАН,  
Российская Федерация, г. Москва,  
e-mail: alexandr-mityagin@yandex.ru  
<sup>2</sup> ФГУП "ЦНИРТИ им. академика А. И. Берга",  
Российская Федерация, г. Москва,  
e-mail: 208\_otd@mail.ru

## ПРИБОР ДЛЯ УНИЧТОЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ С ФЛЕШ-НОСИТЕЛЕЙ

*Рассмотрены вопросы разработки и создания прибора для уничтожения информации с флеш-носителей. В основе работы прибора лежит комбинированный способ воздействия импульсным электромагнитным полем и подача высокого напряжения.*

**Ключевые слова:** уничтожитель информации, флеш-носители информации, электромагнитные поля, высокое напряжение.

### Введение

В последние десятилетия одновременно с ростом глобальных информационных систем и компьютерных сетей начали активно развиваться технические средства, позволяющие добывать конфиденциальную информацию. Необходимость сохранения режимов ограниченного доступа к электронным документам и материалам определила потребность в аппаратуре для гарантированного экстренного уничтожения информации с носителей. Перспективность данного направления обусловлена неуклонно растущим документооборотом, осуществляемым с помощью электронных средств коммуникаций, и внедрением так называемых безбумажных технологий как в сфере бизнеса, так и в сфере государственного управления. Значительные объемы конфиденциальной информации, хранящиеся в базах данных ЭВМ различных государственных и неправительственных структур, представляют собой реальную коммерческую ценность, а их утечка в ряде случаев способна непосредственно влиять на стоимость государственных проектов. Особое значение экстренное уничтожение информации приобретает при случаях неожиданного захвата носителя информации, что часто может происходить

с техникой при риэлтерских атаках или террористических актах.

Системы записи информации на основе неоднородных полупроводниковых носителей, таких как флэш-память, являются важнейшими системами, входящими в состав персональных ЭВМ. Очень малое время доступа — одно из важнейших преимуществ флэш-памяти. Жесткие диски на основе флэш-памяти аналогичны решениям на энергозависимой памяти SDRAM, но они не зависят от подачи энергии. Данные, записанные на флэш-память, остаются там даже после прерывания питания. Высокая скорость записи при последовательном доступе за счет того, что стирание информации во флэш осуществляется блоками, и низкая себестоимость производства флэш-памяти сделали флэш-память одним из наиболее распространенных видов памяти в настоящее время. По прогнозам специалистов, флэш-память в скором времени станет основным, видом памяти в многофункциональных компьютерных системах.

### Носители информации на основе флэш-памяти

Флэш-память, или энергонезависимая память с произвольным доступом, основана на МДП структурах МНОП, а также DRAM- и NAND Flash. Структуры такого типа реализуются на базе полевых транзисторов с изолированным затвором. Пороговое напряжение, определяющее состояние транзистора как уровня логической единицы и нуля, контролируется *встроенными зарядами* — зарядом электронных ловушек на границе раздела  $\text{SiO}_2\text{—Si}_3\text{N}_4$  в случае Si-МНОП структур, или легированного слоя (встроенного полевого электрода) в случае Si-DRAM и NAND Flash структур. Процесс записи/стирания информации для этих структур аналогичен и заключается в подаче импульса повышенного затворного напряжения требуемой полярности и длительности. Также аналогична и физическая картина этих механизмов, связанная с полевой инжекцией носителей заряда из полупроводника на ловушки или легированный слой  $\text{SiO}_2$  как туда, так и обратно. При этом физическое состояние полевого транзистора как элемента памяти, определяемое пороговым напряжением  $V_t$  проводимости инверсионного канала  $G$ , контролируется концентрацией встроенных зарядов  $N_t$  по закону

$$\delta V_t = eN_t/C_0,$$

где  $e$  — элементарный заряд;  $C_0$  — удельная емкость затворного диэлектрика.

### Способы уничтожения информации

Информация, записанная на устройствах флэш-памяти, может быть уничтожена программными и физическими средствами, а также внешним воздействием электрического поля или электромагнитного излучения. Прямой способ воздействия высоким электрическим напряжением (существенно превышающим допустимые значения) на выводы микросхемы применим для микросхем, имеющих электрические выводы шины данных или адреса, т. е. с параллельным доступом. В этом случае подача высокого напряжения на эти выводы позволяет либо полностью уничтожить систему адресации микросхемы, либо записать во все ячейки логический ноль. В обоих случаях прочитать существовавшую ранее информацию будет невозможно. Данный метод может оказаться ограниченно применимым в случае микросхем с последовательным доступом (USB). Устройства флэш-памяти такого типа содержат контроллер, обеспечивающий сопряжение микросхемы памяти с USB-трактом. В этом случае подача высокого напряжения может привести к повреждению некоторых связей внутри микросхемы, не повредив при этом записанную информацию.

Большое число исследований посвящено изучению влияния воздействия электромагнитного излучения на изделия полупроводниковой микроэлектроники. В целом процессы, которые происходят при этих воздействиях, достаточно известны. Однако для задачи разработки аппаратуры гарантированного уничтожения информации с носителей, в основе которых находятся полупроводниковые элементы, необходим более детальный анализ этих процессов. Из анализа процессов переноса зарядов в полевых транзисторах различных типов следует, что импульсное электромагнитное поле индуцирует изменяющееся электрическое поле, создающее на управляющих затворах дополнительное высокое напряжение, изменяющее пороговое напряжение, и носители-электроны переносятся через потенциальный барьер. Иными словами, транзисторы переходят в другие состояния или происходит простой пробой. Напряжение пробоя полевого транзистора при характерном размере 1 мкм приблизительно равно 10 В. Следовательно, необходимо создать импульсное электромагнитное поле, обеспечивающее такую крутизну, чтобы в зазоре, где помещается транзистор, получить напряжение порядка 10 кВ/см.

Индукционные токи, или *токи Фуко*, которые возникают при воздействии импульсным электромагнитным полем, главным образом приводят

к разогреву полупроводникового носителя информации. При повышении температуры растет вероятность пробоя полевого транзистора. В некоторых случаях в носителях информации в том или ином виде могут использоваться теплоотводы. Соответственно для того, чтобы гарантированно вывести транзистор из строя, необходимо его нагреть до температуры порядка 300 °С. Используя простой расчет, можно оценить значения тока, соответствующую температуру, время разогрева и, следовательно, величину переменного электромагнитного поля.

### Прибор для уничтожения информации с носителей на основе микросхем с энергонезависимой памятью

Быстрое развитие элементной базы вычислительной техники приводит к тому, что устройства хранения информации устаревают значительно быстрее, чем хранящаяся на них информация. Все это обуславливает необходимость и актуальность разработки и внедрения устройств, обеспечивающих как утилизацию носителей, так и экстренное уничтожение хранящейся на них информации. Отличительной особенностью таких устройств должна быть гарантированная невозможность восстановления информации с любого фрагмента носителя. Сами устройства должны быть надежными, компактными, простыми в использовании. В разработанном и созданном опытном образце прибора для экстренного уничтожения информации на носителях информации с энергонезависимой памятью мы использовали комбинированный способ, совмещающий метод воздействия сверхкороткими электромагнитными импульсами и воздействие на управляющие выводы носителя импульсом высокого напряжения.

Система облучения носителя информации импульсным электромагнитным излучением [1] содержит:

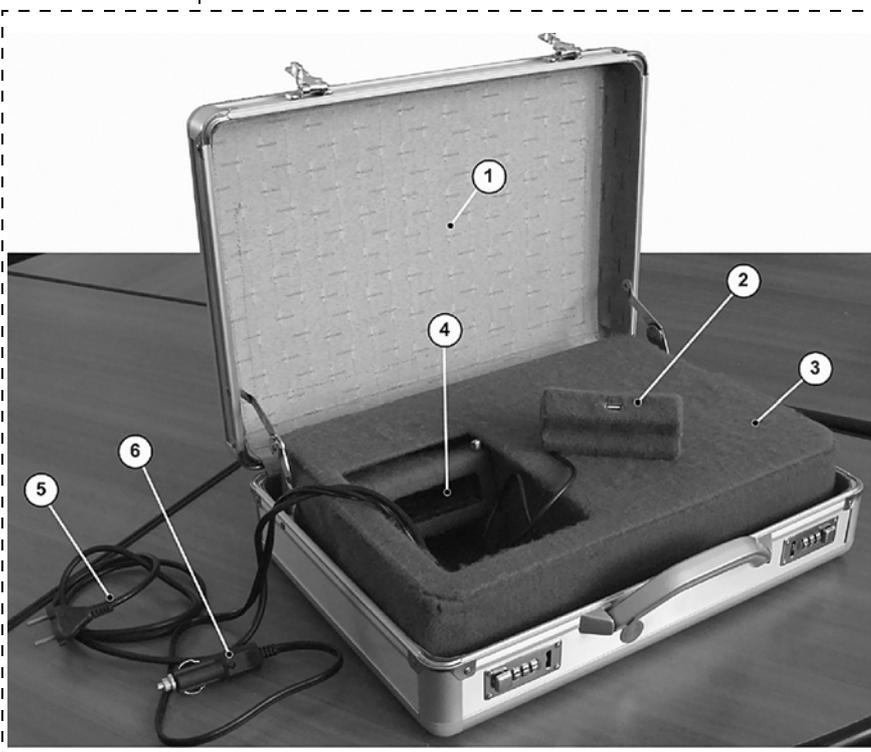
- блок управления и питания, обеспечивающий формирование сигнала запуска для генератора коротких импульсов;
- специальное устройство подключения (коннектор) для подачи напряжения на флеш-накопитель [2];

- генератор коротких импульсов;
- излучающая полеобразующая система и система встроенного контроля.

Разработанная нами универсальная схема генератора [3] позволяет получать импульсы длительность от 3 до 20 нс, энергией до  $4,5 \cdot 10^{-8}$  Дж. Многократное излучение электромагнитных импульсов позволяет пропорционально повысить энергию излучения до  $1,3 \cdot 10^{-2}$  Дж. Излучающая система — полеобразующая система в виде спиральной многодроссельной плоской системы [4] — формирует электромагнитное поле с направлением, перпендикулярным плоскости полупроводникового носителя информации. Автоматическая система контроля [5] позволяет измерять рабочие параметры устройства и генерировать управляющие сигналы для индикации и системы управления аппаратурой. Система управления в устройстве уничтожения информации на полупроводниковых носителях [6] обеспечивает мониторинг рабочих параметров аппаратуры, измерение параметров полеобразующей системы, управление этими полями, а также устройствами, обеспечивающими безотказную и надежную работу при эксплуатации аппаратуры.

На рис. 1 приведен общий вид прибора.

Система программного стирания информации непосредственно с микросхемы памяти с последующим воздействием высоким напряжением на



**Рис. 1. Общий вид прибора:**

1 — кейс; 2 — устройство подключения флеш-носителя; 3 — корпус прибора; 4 — полеобразующая система; 5 — кабель питания для подключения к сети 220 В; 6 — кабель для подключения к бортовому источнику питания 12/24 В

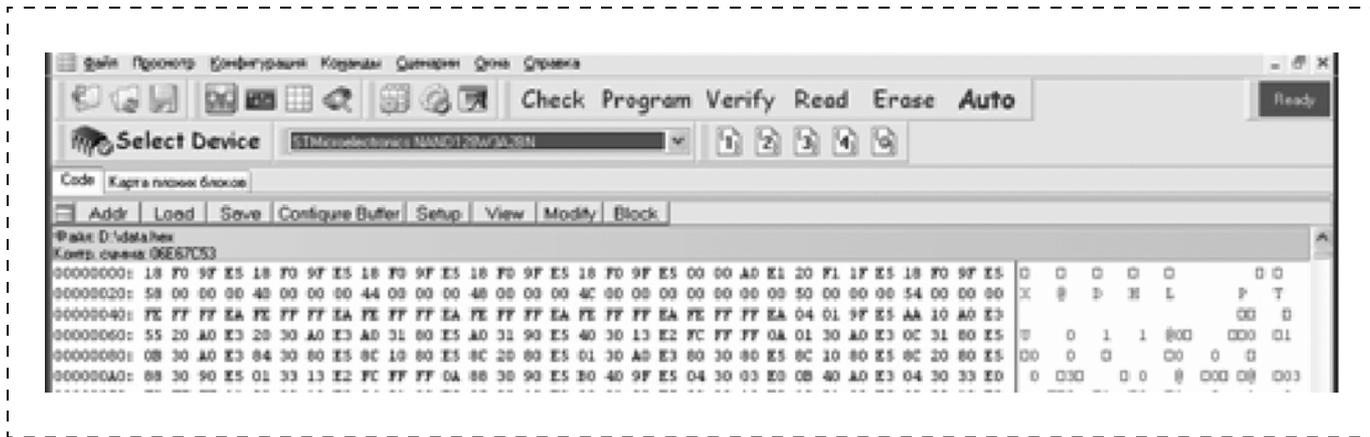


Рис. 2. Фрагмент структуры записанных данных на микросхеме флеш-памяти

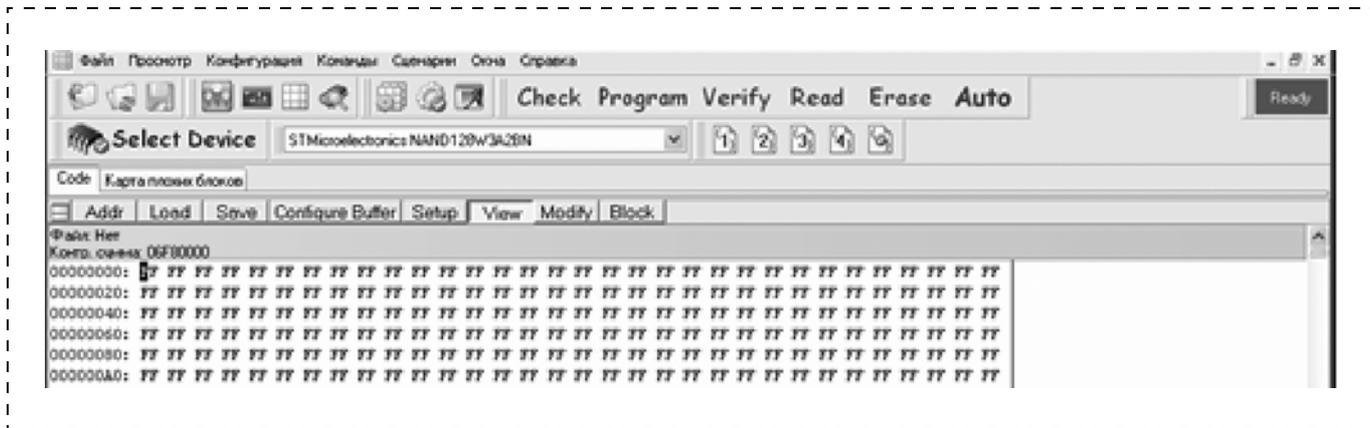


Рис. 3. Фрагмент структуры данных на микросхеме памяти после стирания с помощью прибора

флеш-носитель [7] состоит из устройства заряда, системы импульсного способа подачи питающего напряжения, системы управления разрядом накопителя энергии. Стирание информации осуществляется по специальному алгоритму микроконтроллером посредством замещения информации, записанной на флеш-носителе, на вновь введенные данные. Далее выполняется мгновенный разряд напряжения (порядка 400 В) через входные цепи флеш-носителя, что приводит к выгоранию контроллера и элементов электрической обвязки системы энергонезависимой памяти. Специально разработанные схемы устройства заряда [8], импульсного способа подачи питающего напряжения [9], управления разрядом накопителя энергии [10] значительно сокращают время готовности аппаратуры, повышают коэффициент полезного действия устройства, сокращают время заряда и разряда накопителя энергии. Прибор оборудован системой управления бесперебойной подачей питающего напряжения [11] для работы в различных условиях эксплуатации.

Оценка качества стирания информации проводилась по следующей методике. С помощью персонального компьютера на флеш-носитель заносился полный объем записи данных, причем данные генерировались случайным образом. Далее микросхема флеш-памяти выпаивалась, и с помощью программатора ChipProg+ на персональном компьютере сохранялась структура данных, записанных в ячейки флеш-памяти (чип NAND128W3A2BN6E). Далее флеш-носитель помещался в прибор, и осуществлялось стирание.

На рис. 2 и 3 представлены фрагменты структур данных на микросхеме флеш-памяти до и после стирания с помощью прибора. Приведенные на рис. 2, 3 фрагменты характерны для всего объема флеш-памяти и свидетельствуют о полном уничтожении записанной информации.

### Заключение

Представленный в данной работе прибор оригинален, содержит запатентованные конструктивные решения и является одним из первых, ко-

торый надежно обеспечивает гарантированное уничтожение информации с носителей, в основе которых лежат полупроводниковые элементы. Именно за счет комбинации способов внешнего воздействия достигается надежность и гарантированность. Важной особенностью данного прибора являются разнообразные системы управления и контроля различных параметров систем работы прибора, что также способствует стабильности и качеству его применения. Следует отметить, что при определенных режимах прибора можно добиться гарантированного уничтожения информации без разрушения флеш-памяти.

#### Список литературы

1. Фесенко М. В., Хлопов Б. В. Патент № 2346345 от 10.02.09.

2. Крутов М. М., Митягин А. Ю., Фесенко М. В., Хлопов Б. В. Патент № 2323491 от 27.04.08.

3. Фесенко М. В., Хлопов Б. В. Патент № 2331979 от 20.08.08.

4. Фесенко М. В., Хлопов Б. В. Заявка № 2008104283 от 08.02.08, решение о выдаче патента № ОИС НТИ-70/4142 от 26.12.08.

5. Гуляев Ю. В., Митягин Ал. Ю., Митягин А. Ю., Фесенко М. В., Хлопов Б. В. Патент № 43393 от 10.01.05.

6. Гуляев Ю. В., Герус С. В., Митягин А. Ю., Мокачунин В. Л., Никулин П. В., Фесенко М. В., Хлопов Б. В. Патент № 2267170 от 27.12.05.

7. Фесенко М. В., Хлопов Б. В. Патент № 60255 от 10.01.07.

8. Хлопов Б. В. Патент № 2291500 от 10.01.07.

9. Крутов М. М., Сверчков В. Ф., Теселкин В. А., Фесенко М. В., Хлопов Б. В. Патент № 2321165 от 27.03.08.

10. Герус С. В., Зеленин А. Н., Митягин А. Ю., Мокачунин В. Л., Никулин П. В., Сокаловский А. А., Фесенко М. В., Хлопов Б. В. Патент № 2239884 от 10.11.04.

11. Борисов С. Г., Крутов М. М., Фесенко М. В., Хлопов Б. В. Патент № 2331934 от 20.08.08.

## ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

УДК 519

Д. И. Иванников, аспирант,  
Московский педагогический государственный  
университет, e-mail: dimaiv@inbox.ru

### ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ ХИМИЧЕСКИХ МЕМБРАН

*Описаны методы применения теории распознавания при конструировании химических мембран. Возможность такого применения достигается посредством теоретически обоснованного "проецирования" области задач разделения вещества посредством химических мембран на теорию распознавания образов. Мембрана рассматривается как классификатор, а попадающие на нее частицы — объекты для распознавания. Показано, как можно использовать такое решение при конструировании многоступенчатой системы фильтров, мембранных реакторов и мембран, способных к обучению.*

**Ключевые слова:** распознавание, классификатор, мембранология.

#### Введение

Применение теории распознавания при решении практических задач классификации (отнесение объекта  $S$  к одному из классов  $K_1, \dots, K_L$ ) в большинстве случаев дает положительный результат в ряде теоретических исследований и на практике. Теория распознавания как отдельная научная ветвь информатики появилась именно как адекватный ответ на потребность систематизации все более возрастающего числа задач классификации, решаемых эвристическими алгоритмами [1]. Определение задачи распознавания (см., например, [2, 3]) позволяет соотносить практические задачи с теорией распознавания. Для проблемных областей, в которых отсутствуют адекватные математические модели, перспективен алгебраический метод решения с использованием эвристических информационных моделей, предложенный академиком РАН Журавлевым Ю. И. [2]. Развитый работами академика РАН Матросовым В. Л. (статистическое обоснование алгебраического подхода [4, 5]) и член-корреспондентом РАН Рудаковым К. В. (общая теория проблемно-ориентированного синтеза корректных алгоритмов) метод может применяться при теоретическом обосновании существо-

вания и построении оптимального по качеству алгоритма распознавания. Поиск аналогий в постановке существующих проблем с задачами, решенными инструментарием теории распознавания образов, обеспечил построение оптимальных алгоритмов решения [6, 7].

### Постановка задачи

Классическая постановка задачи распознавания образов содержится, например, в работах [1–4]: множество  $M$  объектов представимо в виде суммы непересекающихся подмножеств (классов)  $K_1, \dots, K_l$ . Известно описание объекта  $S—I(S)$ , по которому требуется установить принадлежность объекта к одному из классов, т. е. для каждого  $j$  вычислить значение предиката  $S \in K_j, j = 1, \dots, l$ . Использование "алгебраического подхода к проблеме распознавания" [1–2, 4–5] на современном этапе развития теории позволяет находить оптимальные решения для большинства формализованных практических задач.

Найдем такое решение для задачи сепарации (разделения) веществ с помощью химической мембраны. Общая постановка и важность такой задачи показана, например, в [8, 9]. Дана смесь некоторых веществ (частиц), требуется из смеси выделить частицы одного типа, используя химическую мембрану (рис. 1).

Частицы разных типов могут различаться по размеру, заряду, форме, симметрии. Химическая мембрана строится таким образом, чтобы, используя один из этих признаков или их комбинацию, пропускать или не пропускать частицы того или иного типа. Задача заключается в построении такой мембраны, которая будет оптимальна сразу по нескольким параметрам: чистоте выделенного ве-

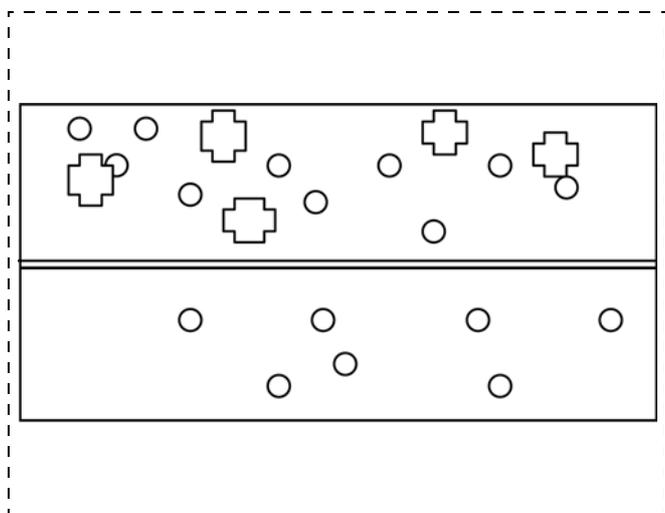


Рис. 1. Резервуар со смесью частиц двух типов, разделенный мембраной, пропускающей только частицы одного типа

щества, затраченном на выделение времени, минимизации затрат на ее создание, экологической составляющей и пр.

Формализуем задачу селекции вещества, объектами будут служить частицы, классами — различные типы частиц, классификатор — химическая мембрана. Будем действовать по определенному алгоритму [10]:

- генерация признаков;
- селекция признаков;
- построение классификатора;
- количественная оценка системы.

Для каждой частицы  $S_j$  можно выделить следующий набор признаков:

- координаты центра;
- геометрическая форма;
- размер;
- заряд;
- симметрия;
- длина свободного пробега.

Из перечисленных признаков выберем размер, заряд, симметрию как наиболее важные для использования далее.

Мембрану (классификатор  $A$ ) можно представить как ограниченную часть плоскости, содержащую поры (рис. 2).

В общем случае поры могут быть разных типов, различаясь по размеру, форме, положению в мембране. На данном этапе будем считать, что все поры  $Q$  одного типа (а значит, размера и формы) распределены в мембране по закону  $f$ . Мембрана пропускает частицу, если одновременно совпадают два условия:

- частица попала в область расположения поры;
- геометрия частицы соответствует геометрии поры (выполнено условие симметрии, размер час-

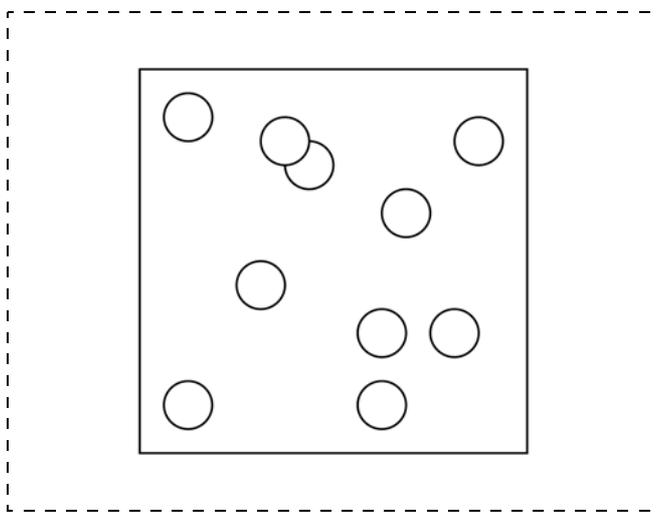


Рис. 2. Возможный вид внешней поверхности мембраны (поры круглой формы, распределение пор случайное)

тицы меньше размера поры), заряд частицы не препятствует проникновению.

Таким образом, действие мембраны на частицу можно разбить на два этапа:

- попадание частицы в область расположения поры;
- проникновение частицы.

В терминах теории распознавания такое разбиение соответствует последовательному действию оператора вычисления оценок  $R_A$  и решающего правила  $r_A$ . При движении частиц вероятность попадания  $i$ -й частицы в область расположения  $j$ -й поры в мембране вычисляется как отношение площади поры к площади всей мембраны:

$$P_{ij} = S_{\text{поры}}/S_{\text{мембраны}}, \quad (1)$$

а вероятность попадания в область расположения одной из пор можно выразить через  $L$  — окрестность центра поры, где  $L$  — длина свободного пробега частицы:

$$P_j(f) = \sum_i \Delta S_i / S_{\text{мембраны}}, \quad (2)$$

где  $\Delta S_i$  —  $L$ -окрестность центра  $i$ -й поры. Таким образом,  $U\Delta S_i$  зависит от  $f$  — распределения пор в мембране. Классификатор  $A$ , зависящий от  $P_{ij}$  и  $P_j$  (1), (2), для конкретной задачи представим в виде

$$A = A(P_{ij}, P_j). \quad (3)$$

Введем функционал качества для данной задачи, с учетом (3), как

$$\Phi(A) = T(A)^{-1} \varphi_{\text{опт}}(A) C^{-1}(A), \quad (4)$$

где  $T(P_{ij}, P_j)$  — время выделения вещества, зависит от структуры мембраны;  $\varphi_{\text{опт}}(A)$  — доля правильных прогнозов (см. [2]);  $C(A)$  — затраты на изготовление мембраны (для нашей задачи примем как произведение геометрического размера поры на число пор). Доля правильных прогнозов определяется как соотношение в отделенном веществе числа нужных частиц ко всем пропущенным частицам;

$$C = R_n N, \quad (5)$$

где  $R_n$  — радиус поры;  $N$  — число пор.

В общем случае множители, произведение которых составляет функционал качества (4), входят в него со своими весами  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ , но на данном этапе их можно не учитывать. Уточним задачу: требуется найти оптимальный классификатор  $A_{\text{опт}}$ , чтобы максимизировать  $\Phi(A)$ .

## Решение задачи

Оценим возможность существования такого решения, для чего покажем существование базиса на  $M$  — модели множества классификаторов  $A$ . Зададим произвольный классификатор  $A$  матричным способом: каждая строка такой матрицы содержит признаки поры в числовом виде (координаты центра поры, размер поры, геометрическая форма поры). Иными словами,  $A \in \{A_{qxl}\}$  — множеству всех классификаторов, содержащих  $q$  пор с  $l$  признаками. При этом, чтобы наложить ограничения на признаки пор (элементы строки матрицы  $A$ ), надо подчеркнуть, что будем рассматривать сложную форму каждой поры как композицию конечного числа пор простой формы (круг, квадрат, равносторонний треугольник), причем число таких простых форм также конечно. На оставшиеся признаки ограничения накладываются логически: координаты центра поры, равно как и ее размеры, не могут выходить за пределы мембраны и превышать ее размеры.

В терминах работы [5] модель  $M = \{A_{qxl}\}$  является полной, так как имеет базис, например, совокупность матриц  $A_{ij}$ :  $\{a_{ij} = 1$ , остальные элементы равны 0}. Полная модель, имеющая корректные решающие правила, содержит оптимальное решение, т. е.  $A_{\text{опт}}$ .

Построить  $A_{\text{опт}}$  можно комбинацией методов случайного поиска и направленного перебора [2]. Для проверки теории решения такой задачи была создана программа Membrane [11, 12]. Экспериментальный ящик был заполнен частицами трех типов шарообразной формы, диаметрами  $a, 2a, 3a$ , по 5000 частиц каждого типа. Первоначально было выбрано такое число пор круглой формы диаметром  $4a$ , чтобы сумма их площадей занимала 10 % от площади мембраны — квадрата со стороной  $100a$ . Считается, что разделение идет без начальной информации  $I_0$ , а значит, алгоритм построения оптимального классификатора "не знает" размеров частиц. Эксперимент считался завершенным, если градиент давления становился равным нулю или не менялся в течение длительного времени  $\Delta T$ . Результаты изменения  $C, T, \varphi_{\text{опт}}, \Phi$  представлены в таблице.

**Результаты пошагового изменения параметров, входящих в функционал качества при применении алгоритма построения оптимального классификатора**

Шаг	$C(N, R)$	$T$	$\varphi_{\text{опт}}(A)$	$\Phi(A)$
0	80 (40, 4a)	134	0,34	$3,109 \cdot 10^{-5}$
1	60 (40, 3a)	212	0,41	$3,223 \cdot 10^{-5}$
2	30 (30, 2a)	232	0,73	$1,048 \cdot 10^{-4}$
3	15 (30, 1a)	251	1	$2,629 \cdot 10^{-4}$
4	10 (20, 1a)	398	1	$2,487 \cdot 10^{-4}$
5	12,5 (25, 1a)	276	1	$2,869 \cdot 10^{-4}$
6	13,5 (27, 1a)	263	1	$2,788 \cdot 10^{-4}$
7	13 (26, 1a)	269	1	$2,830 \cdot 10^{-4}$

Таким образом, в терминах [4] были подобраны параметры алгоритма для нахождения оптимальной матрицы для  $A_{\text{опт}}$ .

### Усложнение задачи

Задача, имеющая место на практике, сложнее описанной выше по следующим параметрам:

- частицы и мембрана могут быть заряжены;
- поры в мембране могут быть разных типов и симметрии;
- возможно применение нескольких последовательно стоящих мембран;
- мембрана (классификатор) может быть обучаемая.

Первые два пункта разрешаются добавлением признаков в объекты на распознавание и матрицу классификатора.

Несколько последовательно расположенных мембран идентично применению к объектам последовательно нескольких классификаторов. Алгоритм нахождения оптимального по качеству набора классификаторов теоретически обосновано в работах [3—5]. Пусть для каждого класса  $M_i$  найден оптимальный по качеству алгоритм, задача состоит в подборе функции  $f_n$  трехзначной логики, такой что  $f_n(A_1, \dots, A_n)$  является алгоритмом, оптимальным по функционалу качества. Построение требует не более  $1,5ql$  вычислений "локальных" функционалов качества, но фактически число таких вычислений может быть уменьшено, если применять методы оптимизации. Практически такая задача может быть поставлена при многоступенчатой очистке воды от примесей [13] и при построении мембранного реактора [14].

После многократного соударения частиц условного типа  $A$  о пору последняя, при некоторых условиях, может начать пропускать частицы этого типа, даже если ранее не пропускала их. Данная особенность мембран в рамках теории распознавания описывается термином "обучающая информация" и достаточно подробно изучена, что может быть использовано на практике.

### Выводы

На ранних этапах становления теория распознавания обобщала имеющиеся эвристические решения практических задач, стоящих перед научным миром [1]. Созданный усилиями многих ученых теоретический инструмент может быть успешно применен во многих областях знаний. Обоснование применения его при конструировании химических мембран дает возможность экономии времени и средств. Ранее нахождение оп-

тимального по качеству классификатора на практике приводило к многодневной работе программы Membrane, теперь с помощью теории распознавания время, затраченное на процесс, сокращается до нескольких минут.

Конечно, остается много сложных вопросов, требующих дальнейшего изучения. Один из них: "Можно ли перенести использование теории распознавания с химических мембран на биологические?". Ответ на этот вопрос может дать изучение некоторых до сих пор слабо исследованных функций и особенностей биологических мембран.

*В заключение автор выражает благодарность профессору, д-ру техн. наук Ю. В. Панфилову за руководство при выполнении математической части работы и профессору, д-ру хим. наук Ю. С. Мардашеву за руководство при выполнении физической части работы.*

### Список литературы

1. Рудаков К. В. О некоторых классах алгоритмов распознавания (Общие результаты. Параметрические модели). М.: ВЦ АН СССР, 1980. 66 с; 1981, 48 с.
2. Журавлев Ю. И. Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания или классификации // Проблемы кибернетики. М.: Наука, 1978. Вып. 33. С. 5—68.
3. Вапник В. Н., Червоненкис А. Я. Теория распознавания образов. М.: Наука, 1974. 415 с.
4. Матросов В. Л. Емкость алгебраических расширений модели алгоритмов вычисления оценок // Журнал вычислительной математики и мат. физики. 1984. Т. 24. № 11. С. 1719—1730.
5. Матросов В. Л. Оптимальные алгоритмы в алгебраических замыканиях операторов вычисления оценок // ДАН СССР. 1982. Т. 261. № 4. С. 818—822.
6. Горелик А. Л., Гуревич И. Б., Скрипкин В. А. Современное состояние проблемы распознавания. М.: Радио и связь, 1985. 160 с.
7. Журавлев Ю. И., Рязанов В. В., Сенько О. В. Распознавание. Математические методы. Программная система. Практические применения. М.: Фазис, 2005, 159 с.
8. Платэ Н. А. Мембранные технологии — авангардное направление развития науки и техники XXI века // Мембраны. 1999. № 1. С. 1—19.
9. Матросов В. Л., Мардашев Ю. С., Иванников Д. И. Иллюстрации к теории распознавания образов // Актуальные проблемы математики, информатики и образования. М.: МПГУ, 2007. С. 116—120.
10. Местецкий Л. М. Математические методы распознавания образов. Курс лекций. 2002—2004. 85 с.
11. Грацианова Т. Ю., Иванников Д. И., Мардашев Ю. С. "Мягкая" имитационная модель диффузии через мембрану конечной толщины // Научные труды МПГУ. Сер. "Естественные науки". 2003. С. 253—256.
12. Иванников Д. И., Мардашев Ю. С. Моделирование селективного переноса частиц через структурированную мембрану // Третьи Курдюмовские чтения: синергетика в естественных науках. Матер. междунар. междисциплинарной научной конференции. Тверь. 2007. С. 169—173.
13. Федоренко В. И. Повышение эффективности многослойного фильтрования воды // Мембраны. 2006. Т. 31. С. 25—44.
14. Грязнов В. М., Орехова Н. В. Катализ благородными металлами. Динамические особенности. М.: Наука, 1989. 224 с.

С. М. Алфимов, нач. отдела ОАО "ГАК  
"Оборонпромэкспорт", melnikov@mircea.ru

## О ВВЕДЕНИИ СТАНДАРТОВ ПО МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ

*Представлены основные понятия, термины и определения для изделий микросистемной техники с указанием видов микросистем и функциональных устройств.*

**Ключевые слова:** микросистемная техника, термины, определения, понятия.

В настоящее время Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии на территории Российской Федерации введены в действие с 1 июля 2009 г. два стандарта в области микросистемной техники — первый устанавливает термины и определения (ГОСТ РВ 0159-002—2008), а второй связывает термины, определения и буквенные обозначения параметров (ГОСТ РВ 0159-003—2008).

Микросистемы в функционально завершенном виде представляют собой информационно-управляющие системы различного назначения, структурно объединяющие подсистемы сбора и обработки информации, которые вырабатывают воздействия на исполнительные устройства и далее — на объект управления.

Функциональными микроустройствами информационно-управляющей части микросистем являются: преобразователи физических величин, усилители, аналоговые ключи и коммутаторы, делители частоты, преобразователи цифроаналоговые и аналого-цифровые, микроконтроллеры, микропроцессоры и цифровые процессоры сигналов, цифровые и логические схемы, запоминающие устройства.

Функциональными исполнительными микроустройствами микросистем являются микродвигатели, микроэлементы гидравлики, микросопла, микропоршни, микроредукторы, микрозеркала, микроприводы, конструктивно выполненные в объеме и на поверхности полупроводникового кристалла с применением базовых и модифицированных процессов микроэлектроники, оптоэлектроники, пьезоэлектроники и др.

Изделия микросистемной техники представляют собой не только новый, но и прорывной класс наиболее сложных комплексированных электронных изделий, без развития которого невозможно построение перспективных роботизированных и

"интеллектуальных" систем и комплексов радиоэлектронной аппаратуры различного назначения.

Опыт создания, развития и применения изделий микросистемной техники в качестве комплектующих радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) активно формируется и в нашей стране, и за рубежом, но пока все еще невелик. Разработанные стандарты позволят в ближайшем будущем сформировать единую государственную систему нормативной документации в области стандартизации и унификации изделий микросистемной техники как составляющей электронной компонентной базы общего назначения.

Представленные ниже термины [1, 2] и их определения в области изделий микросистемной техники систематизированы так, что для каждого технического понятия установлен один стандартизованный термин. Определения составлены так, что при необходимости их можно изменять, вводя производные признаки, раскрывающие значения используемых в них терминов с указанием объектов, входящих в состав определяемого технического понятия.

**Микросистемная техника** — совокупность научно-технических и технологических способов, обеспечивающих создание в объеме и (или) на поверхности твердого тела упорядоченной композиции микрометровых и субмикрометровых областей материалов с заданными составом, структурой и геометрией, и направленная на реализацию функций восприятия, преобразования, хранения, обработки, трансляции информации, энергии, движения и выработки управляющих воздействий в требуемых режимах и условиях эксплуатации.

**Изделие микросистемной техники (микросистема)** — совокупность микроэлектронных управляющих и функциональных исполнительных элементов и компонентов в едином конструктивном исполнении, принцип действия которых основан на электрофизических, электромеханических, электрохимических, электронно-оптических, фотохимических процессах и явлениях с учетом эффектов масштабирования при переходе от макро- и наноразмерным уровням, и предназначенных для реализации функций приема, преобразования, хранения, передачи информации, энергии и движения для выполнения функции конечного назначения в заданных режимах эксплуатации.

**Микросистемная технология** — последовательность технологических операций групповой микрообработки поверхности материала заготовки в целях изготовления, сборки, корпусирования и измерения элементов, компонентов и узлов микросистемы.

**Микросистемный материал** — материал, непосредственно входящий в состав функциональных и конструктивных частей микросистем, упоря-

доченный в микрообъемах и обладающий отличительными свойствами, обусловленными эффектами субмикрометрового масштабирования.

**Элемент микросистемы** — часть микросистемы или функционального микроустройства, реализующая определенную функцию в составе функционального устройства или микросистемы, которая не может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации.

**Компонент микросистемы** — часть микросистемы или функционального устройства, реализующая определенную функцию в составе функционального устройства или микросистемы, которая может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации.

Устройства МСТ, как правило, выполняются на основе базовых и (или) модифицированных технологических процессов микроэлектроники и содержат электронную часть (прием, нормирование, первичное и вторичное преобразование сигналов, обработка, хранение, распределение и передача информации на исполнительную часть (актюатор) и исполнительную часть (актюатор, силовое оконечное устройство).

Функции электронных управляющих устройств выполняют: чувствительные элементы преобразователей физических величин и компонентов датчиков (ПФВ ИКД); аналоговые мультиплексоры или аналоговые ключи и коммутаторы; устройства выборки и хранения; операционные и измерительные усилители; фильтры; аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи; компараторы напряжения; микропроцессоры и цифровые процессоры обработки сигналов; цифровые и логические схемы; запоминающие устройства; аналоговые демультимплексоры и др.

Функции исполнительных устройств выполняют различные микроэлектромеханические, микрооптоэлектромеханические, микрофлюидные и иные устройства и их функциональные узлы в виде микродвигателей, элементов гидравлики, сопел, поршней, захватов, зацепов, редукторов, шестерней, зеркал и т. п.

Указанные функциональные подсистемы МСТ (или неполные микросистемы [1, 2]) структурно могут состоять из различных наборов перечисленных выше электронных и, например, микромеханических устройств и поэтому описываться по входам и выходам через принадлежащие этим устройствам параметры и характеристики. Тогда такие параметры и характеристики переходят в принадлежность МСТ в целом и описывают их технические и эксплуатационные свойства, увязываются с энергетическими, временными и надежностными показателями.

В соответствии с этой логикой характеристики входного сигнала МСТ становятся информативным параметром, связанным с измеряемой (контролируемой, преобразуемой) входной физической величиной, а характеристики выходного сигнала являются информативными параметрами на выходе МСТ. Указанные группы параметров и характеристик по входам и выходам увязаны между собой через заданную целевую функцию МСТ.

Система требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации изделий МСТ, как и других изделий в составе электронной компонентной базы, основывается на унифицированной системе параметров и характеристик, которые описывают функциональные, технические и эксплуатационные свойства изделий. В частности, на МСТ распространены положения ГОСТ 17021 "Микросхемы интегральные. Термины и определения", ГОСТ 17467 "Микросхемы интегральные. Основные размеры", ГОСТ 18682 "Микросхемы интегральные. Система условных обозначений", ГОСТ 19480 "Микросхемы интегральные. Термины, определения и буквенные обозначения электрических параметров", ГОСТ Р 51068 "Датчики и преобразователи физических величин электронные. Термины и определения" и ряда других стандартов группы однородной продукции "микросхемы интегральные".

Технический уровень МСТ может быть представлен через совокупность входных, выходных, статических, динамических, энергетических, конструктивно-технологических и эксплуатационных параметров и характеристик.

Конструктивно-технологические особенности конкретных типов МСТ могут быть выражены через систему идентификации вида исполнения (корпусное, бескорпусное, гибридно-модульное), значений статических потенциалов и пр.

Представленные в [2] термины, определения и буквенные обозначения параметров и характеристик МСТ увязаны между собой и систематизированы.

Определенность в области системы базовых параметров и характеристик МСТ позволила определиться с рациональной классификацией и системой идентификации их типов.

МСТ подразделяют на информационно-управляющие (неполные микросистемы), исполнения (неполные микросистемы) и полные (совмещенные информационно-управляющие микросистемы и микросистемы исполнения).

К классификационным признакам МСТ принято относить принцип действия, вид конструктивно-технологического исполнения, вид входного сигнала (физической величины), вид выходного сигнала (воздействия).

Как отмечалось выше, указанная совокупность параметров может быть дополнена любым набором параметров и характеристик, функционально принадлежащих устройствам и узлам на входах и выходах МСТ конкретного класса и (или) типа.

*Авторы выражают глубокую признательность за поддержку в проведении исследований и практических работ по проблематике изделий микросистемной техники В. Д. Вернеру, А. Н. Саурову, А. А. Ива-*

*нову, В. А. Тельцу, Н. Г. Коломенской, В. В. Лучинину, П. П. Мальцеву, И. В. Поповой.*

#### Список литературы

1. Вернер В. Д., Иванов А. А., Коломенская Н. Г. и др. Изделия микросистемной техники — основные понятия и термины // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 12. С. 2—5.
2. Иванов В. Д., Коломенская Н. Г. и др. Изделия микросистемной техники — термины и определения, классификация и обозначения типов // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 1. С. 2—5.

## СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

УДК 621.382.2

**В. А. Губарев**, канд. техн. наук, доц.,  
Московский государственный институт  
радиотехники, электроники и автоматики  
(технический университет) (МИРЭА),  
e-mail: c\_vt@fvms.mirea.ru

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ В СИСТЕМНЫХ МОДЕЛЯХ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ, РЕАЛИЗУЕМЫХ В СБИС КЛАССА «СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ»

*Наличие в составе технического задания на проектирование СБИС класса «Система на кристалле» (СнК) системной транзакционной модели реализуемого устройства может значительно снизить риск конструкторов конечных изделий (систем) и сократить сроки создания СБИС СнК. Описываются методы моделирования времени выполнения алгоритмов в системных моделях СБИС СнК, создаваемых с использованием языка SystemC в стиле блочного проектирования.*

**Ключевые слова:** СБИС класса «Система на кристалле», системная модель, моделирование времени выполнения.

#### Введение

Возможности современных САПР электронных устройств и промышленного производства СБИС класса «Система на кристалле» (СБИС СнК) позволяют создавать на одной кремниевой подложке функциональные части (тракты) конечных изделий — комплексов систем управления и радиоэлектронных систем.

Существующее разделение сфер деятельности организаций, создающих конечные изделия, — системных организаций, и специализированных организаций, проектирующих СБИС СнК, — дизайн-центров, обуславливает выдачу проектной организации соответствующего технического задания (ТЗ).

Считается необходимым [1] включать в ТЗ транзакционную системную модель изделия, реализуемого в СБИС СнК, — модель системного уровня маршрута сквозного проектирования СБИС. Модель выполняется на алгоритмическом языке высокого уровня, обычно SystemC.

В настоящее время одним из прогрессивных стилей проектирования является многократное использование IP-блоков, так называемое блочное проектирование. В стиле блочного проектирования СБИС СнК проектируется как комбинация IP-блоков [1].

Системная модель на языке SystemC, соответствующая стилю блочного проектирования, создается системной организацией и структурно представляет собой совокупность МОДУЛЕЙ, содержащих ПРОЦЕССЫ, соединенных КАНАЛАМИ<sup>1</sup>. Модель обеспечивает системной организации оценку выполнения системной функции (например первичную ЦОС в радиолокационном тракте за заданное время), а проектной организации — определение возможности дальнейшего СнК-проектирования с использованием доступных IP-блоков [2].

В ПРОЦЕССАХ моделируется время выполнения соответствующих частей системного алгоритма —

<sup>1</sup>МОДУЛЬ, ПРОЦЕСС, КАНАЛ — объекты языка SystemC.

**задержек**, вносимых ПРОЦЕССАМИ в общее время выполнения системной функции.

В соответствии со стилем блочного проектирования **задержка** должна быть выражена в форме, коррелированной с параметрами быстродействия *IP*-блоков.

Анализ характеристик зарубежных и отечественных *IP*-блоков [3] показывает, что обычно в числе характеристик их быстродействия указываются:

- производительность для процессорных *IP*-блоков (единица измерения — млн оп/с с плавающей или фиксированной точкой);
- пропускная способность (производительность) для периферийных *IP*-блоков (байт/с);
- тактовая частота (Гц).

Ниже изложены методы определения **задержек** в ПРОЦЕССАХ для случаев, когда алгоритмы функционирования моделируемых систем представлены в явной аналитической форме — аналитический метод, и в общей описательной (вербальной) форме — метод учета производительности *IP*-блоков.

#### Аналитический метод

Методы теории алгоритмов позволяют сравнивать алгоритмы времени их выполнения на основе функции трудоемкости [4]. При этом под трудоемкостью алгоритма для данной конкретной проблемы понимается число «элементарных» операций, задаваемых алгоритмом в принятой модели вычислений.

Обычно используется модель обобщенной однопроцессорной машины с произвольным доступом к памяти (RAM). В этой модели все команды процессора выполняются последовательно; одновременно выполняемые команды отсутствуют.

Значимыми «элементарными» операциями — инструкциями процедурных языков высокого уровня, на которых записываются алгоритмы, считаются:

- простое присваивание  $a \leftarrow b$ ;
- одномерная индексация  $a[i]$  (адрес ( $a$ )+  $i$  длина элемента);
- арифметические операции сложения/вычитания:  $\{+, -\}$ ;
- арифметические операции умножения/деления(уд):  $\{*, / \}$ ;
- операции сравнения:  $a \{<, >, =, \geq, \leq\} b$ ;
- логические операции:  $(l_1) \{or, and, not\} (l_2)$ ;
- операции адресации в сложных типах данных ( $a$ ):  $(name_1 name_2)$ .

Системная модель создается для уже выбранных системной организацией конкретных алгоритмов. Поэтому определение функции их трудоемкости не требуется, достаточно определить трудоемкость

заданного алгоритма для максимального объема входных данных. При этих условиях возможно определять **задержку** — максимальное время выполнения заданного алгоритма — методом прямого определения [5].

Подсчет числа «элементарных» операций в алгоритме может быть проведен с использованием одной из известных программ-анализаторов при реализации алгоритма на максимальном объеме входных данных на инструментальной ЭВМ в режиме, отвечающем условиям принятой модели вычислений.

При последовательном выполнении операций — худший случай, физическое время выполнения алгоритма — **задержка**  $\Delta T$  ПРОЦЕССА может быть определена следующим образом:

$$\Delta T = \frac{1}{f_0} \sum_{i \in S} m_i k_i, \quad (2)$$

где  $S$  — множество типов «элементарных» операций в алгоритме из указанных в перечне (1);  $f_0$  — тактовая частота синхронизации аппаратной платформы реализации *IP*-блока;  $m_i$  — число тактов выполнения  $i$ -й элементарной операции,  $m_i \geq 1$ ;  $k_i$  — число «элементарных» операций  $i$ -го типа в множестве  $S$ .

Схемотехнические решения, используемые в настоящее время для реализации логических и арифметических функций на физическом уровне СБИС, а также в ПЛИС, основаны на широком использовании схем ускоренного переноса, сдвиговых регистров на основе таблиц соответствия, встроенных умножителей с накоплением и на других аналогичных средствах. Поэтому когда все «элементарные» операции из перечня (1) последовательно выполняются за один такт синхронизации,  $m_i = 1$  в формуле (2), **задержка** равна

$$\Delta T = \frac{1}{f_0} \sum_{i \in S} k_i, \quad (3)$$

Рабочая частота внутренней синхронизации элементов физического базиса *IP*-блока  $f_p$  может быть выше тактовой частоты внешней синхронизации  $f_0$  аппаратной платформы реализации. В этом случае для выполнения за один такт внешней синхронизации всех «элементарных» операций, требующих  $m_i$  тактов, необходимо выполнение условия

$$f_p = m_{i, \max} f_0, \quad (4)$$

где  $m_{i, \max}$  — максимальное число тактов, которое требуется для выполнения любой из элементарных операций перечня (1).

Аналитический метод в настоящее время используется в практике создания системной модели тракта цифровой обработки радиолокационных сигналов.

## Метод учета производительности IP-блоков

Часто, особенно при моделировании сложных вычислительных систем, функциональных частей КСА или систем управления, аналитическая форма алгоритма их функционирования в целом может отсутствовать. Обычно имеются вербальное описание общего алгоритма, количественные оценки времени выполнения системных функций и трудоемкости отдельных этапов общего алгоритма, например, максимально допустимое время решения типов задач пользователей, объемы их программных реализаций, объемы входных и выходных данных и т. д.

В этих случаях большое значение приобретает опыт системных специалистов. Модель системного уровня маршрута сквозного проектирования СБИС — виртуальная транзакционная системная модель СБИС СнК создается вне связи с возможной реализацией. Однако в их структуру и разбиение на части — МОДУЛИ SystemC — обычно уже заложены представления системного специалиста об общетехнических принципах построения и функционирования изделия, подлежащего реализации в СБИС СнК. Например, в самом первом приближении вычислительная система представляется состоящей из системы ввода, вычислительного устройства и системы вывода, сетевое устройство — коммутатор — из подсистемы входных и выходных портов и подсистемы коммутации и т. д. Поэтому выделенные в структуре SC-модели МОДУЛИ и ПРОЦЕССЫ в них ориентированы, в стиле блочного проектирования, на классы IP-блоков библиотек проектировщика, точнее на их временные характеристики. В данном контексте под классом IP-блоков подразумевается совокупность IP-блоков определенного функционального назначения, например, IP-блоки устройств ввода/вывода.

Определение **задержек** при этом возможно с использованием характеристик производительности соответствующих классов IP-блоков.

Пусть в ПРОЦЕССЕ имитируется выполнение какой-либо части системной функции обработчиком, например абстрактным обрабатывающим устройством, имеющим производительность  $P$  [оп/с, байт/с и т.п.].

Тогда **задержка** ПРОЦЕССА может быть определена следующим образом:

$$\Delta T = dQ, \quad (5)$$

где  $d = \frac{1}{P}$  — **задержка** (время выполнения) на одну операцию [с];  $Q$  — трудоемкость обработки имитируемой части функции [число операций].

Операция — одно действие с числом, представленным в формате с плавающей точкой.

Архитектура и организация функционирования современных вычислительных систем обеспечивает выполнение большинства операций за один такт синхронизации, однако в общем случае время выполнения одной операции **задержка**  $d$  равна

$$d = n_i \tau, \quad (6)$$

где  $n_i$  — число тактов синхронизации;  $\tau = 1/f_0$  длительность такта синхронизации [с];  $f_0$  — тактовая частота синхронизации.

Тогда с учетом (5) и (6) **задержка** ПРОЦЕССА может определяться как

$$\Delta T = \frac{1}{f_0} Q \sum_{i \in S_1} n_i, \quad (7)$$

где  $S_1$  — множество машинных операций, реализованных в обработчике.

Метод учета производительности IP-блоков применен на практике при создании системной SC-модели многозадачного вычислительного тракта [6].

## Заключение

Время выполнения алгоритмов в моделях цифровых устройств в СБИС класса «Система на кристалле», создаваемых средствами языка SystemC, представляется в виде **задержек**, вносимых ПРОЦЕССАМИ, имитирующими соответствующую функциональность.

Для определения **задержек**, в зависимости от формы представления алгоритмов, может применяться аналитический метод или метод учета производительности IP-блоков.

Методы ориентированы на применение в моделях, создаваемых в стиле блочного проектирования — повторного применения IP-блоков.

## Список литературы

1. Немудров В., Мартин Г. Системы на кристалле. Проектирование и развитие. М.: Техносфера, 2004.
2. Губарев В.А. Актуальные вопросы применения современной электронной компонентной базы в системах управления // Вопросы радиотехники. Сер. «Вычислительная техника» (ЭВТ). 2006. Вып. 2. С. 116—123.
3. Бюллетени о состоянии с разработками СФ-блоков и СБИС типа «Система на кристалле» и проектированием РЭА на основе СБИС СнК. М.: ОАО «Российская электроника», 2006, 2007.
4. Макконелл Дж. Основы современных алгоритмов. М.: Техносфера, 2006.
5. Ульянов М. В. Метод прогнозирования временных оценок программных реализаций на основе функции трудоемкости // Информационные технологии. 2004. № 5. С. 54—62.
6. Губарев В. А., Петухов Г. П., Волхонский А. Н. Методы технологии создания системных моделей цифровых устройств, реализуемых в СБИС класса «Система на кристалле» // Вопросы радиотехники. Сер. «Вычислительная техника» (ЭВТ). 2009. Вып.1. С. 39—46.

# CONTENTS

**Zablotskiy A. V., Melentiev P. N., Sheshin E. P., Baturin A. S., Balykin V. I., Korostilev E. V., Lapshin D. A., Kuzin A. A.** *Application of Virtual Scanning Electron Microscope for Parameters Characterization of Atomic Nanolithograph Microlenses* . . . . . 2

In this paper we present results of geometrical parameters' measurements of objects which size is comparable with SEM electron probe diameter — open aperture with diameter about 50 nm made in ultra thick membrane (with a thickness less than 50 nm), having use as a microlense in the atom projection nanolithograph. For the first time in microscopy of such objects we have implemented an approach based on supplementing experimental data of standard SEM by computer simulated results of "virtual SEM".

**Keywords:** SEM, nanometrology, atomic optic, nanolithography.

**Akopyan V. A., Panich A. A., Rozhkov E. V., Shevtsov S. N.** *Measuring-Informative Complex for Modeling and Damping of the Aircraft Element Oscillation* . . . . . 7

The scheme and construction of the measuring-informative complex for active control and damping of the aircraft element oscillations have presented. It has been used for selection of optimal parameters of the oscillation control. Some characteristics of process of the oscillation damping for decreased model of helicopter Mi-2A blade have been investigated.

**Keywords:** measuring-informative complex, MEMS, modeling, oscillations, damping, piezoelectric actuators, sensors.

**Gureev A. V., Voronin S. E.** *Triangular Pulse Shaping Method for Ultra Wideband system* . . . . . 14

In this article proposed controlled triangular impulse generator with feedback. Examination of a noise in this system, perform calculation of spectral concentration triangular pulse and equivalent noise sequence this impulse, value of amplitude difference got from CAD "Cadence", in simulation generator.

**Keywords:** ultra wide band, triangular puls, transmitter, gaussian (pulse).

**Vetrov S. I., Gorokhov V. S., Skvortsov A. V., Chmyr D. A., Skvortsova D. A.** *System Approach for Designing Distributed Nanotechnological Production Systems* . . . . . 17

Article describes prerequisites for nanotechnological productions development in conditions of globalization of market economy and full automation of production based on networking and informational technologies. Nanocutting processes characteristics and principles of organizing of distributed production systems and virtual enterprises based on technological hyperenvironment with the help of CALS and PLM-technologies are examined. System aspects of creating of virtual enterprises and their common informational space for manufacturing nanotechnological production are described.

**Keywords:** flexible nanotechnological module, nanocutting, distributed production environment, virtual enterprise, common informational space.

**Kondrashin A. A., Sleptsov V. V., Ljamin A. N.** *The Colour Image Formation by Organic Light-Emitting Diodes* . . . . . 27

This article is about an analysis of the main types of organic light-emitting diodes (OLED and PLED), basic work principles and the main advantages in comparison with LCD, PD and LED technologies. The comparison of color image formation technologies in organic light-emitting diodes, their advantages and disadvantages are presented in the article. The nearest scientific and technical tasks, the solving of which is necessary for the prompt application of organic light-emitting diodes in various spheres of economic activities are mentioned.

**Keywords:** organic light-emitting diodes, technology OLED, technology PLED, color image formation, development prospects.

**Belkin M. E., Belkin L. M.** *Research of Semicondutor Laser Productivity for Microwave-band Subcarrier Multiplexed Analog Signal Transmission* . . . . . 32

Experimental investigation principles and specialties of the semiconductor laser characteristics with the goal of microwave-band subcarrier multiplexed analog signals transmission quality estimation by such a source are highlighted. The investigation approach, procedures, and results of signal-to-noise, related intensity noise, and signal-to-intermodulation noise characteristics measurements are presented that confirm the productivity of the designed laser with power-to-bandwidth product of more than 300 mW · GHz for subcarrier multiplexed analog signal transmission with the modulation bandwidth up of 10 GHz.

**Keywords:** semiconductor laser, subcarrier multiplexed microwave-band analog signal transmission characteristics, fiber optic systems.

- Belozubov E. M., Belozubova N. E.** *Thin-Film Strain Gauge Microelectromechanical Systems with Identical Strain-Sensing Elements and Solid Center Diaphragms*. . . . . 38  
Thin-film strain gauge microelectromechanical systems (TSMEMS) with identical strain-sensing elements and solid center diaphragms are studied. We show merits and new capabilities of such TSMEMS under transient temperatures.  
**Keywords:** thin-film strain gauge microelectromechanical systems (TSMEMS), strain-sensing element, diaphragm, solid center.
- Gulyaev Yu. V., Lobanov B. S., Mityagin A. Yu., Fesenko M. V., Hlopov B. V.** *Flash Memory Degausser* . . . 42  
The questions of the development and making the instrument for destruction of information with carriers on base of the microcircuits with nonvolatile memory are discussed. In base of the functioning the instrument lies the multifunction way of the influence by pulsed electromagnetic floor and presenting of high power.  
**Keywords:** degausser, flash memory, electromagnetic fields, high power.
- Ivannikov D. I.** *Pattern Recognition Theory Application in Chemical Membranes Designing*. . . . . 46  
It is described recognition theory application of designing chemical membranes in the article. Possibility of such application is reached by means of theoretically well-founded area "displaying" of substance division problems by means of chemical membranes on the theory of pattern recognition and image analysis.  
The membrane is considered as the qualifier, and particles getting on it — objects for recognition. It is shown, how it is possible to use such decision at designing of multistage system of filters, membrane reactors and the membranes capable to training.  
**Keywords:** pattern recognition, qualifier, membranes.
- Alfimov S. M.** *Concerning the Introduction of Microsystem Techniques* . . . . . 50  
The principal concepts, terms and definitions for products of microsystem technology with indication of microsystems forms and functional devices are presented.  
**Keywords:** microsystem techniques, definitions, terms, concepts.
- Gubarev V. A.** *Algorithm Execution Time Simulation (Modeling) for Digital System Models (Devices) Based on SOC VLSI Circuits* . . . . . 52  
Inclusion of TLMs (transaction-level models) in system requirements specification for COS VLSI circuit models development may significantly decrease development risk for real system programmers and reduce SOC VLSI circuits development time.  
The purpose of this paper is to describe methods of algorithm execution time simulation for SOC VLSI models, developed with SystemC modeling language in module-type development.  
**Keywords:** SOC VLSI circuit, system model, execution time simulation (modeling).

**For foreign subscribers:**

*Journal of "NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE" (Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, ISSN 1813-8586)*

*The journal bought since november 1999.  
Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev  
ISSN 1813-8586.*

**Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(499) 269-5510.  
E-mail: nmst@novtex.ru; <http://www.microsystems.ru>**

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru  
Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.  
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т. Н. Погорелова. Технический редактор Е. М. Патрушева. Корректор Т. В. Пчелкина

Сдано в набор 15.09.2009. Подписано в печать 20.10.2009. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,39. Заказ 965. Цена договорная

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15