

## **Автоматизированная пространственная оптимизация компоновки блока управления датчика давления по тепловому критерию**

© К.А. Андреев, А.И. Власов, Э.Н. Камышная,  
Ю.Н. Тиняков, А.В. Лавров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*В статье рассматриваются варианты оптимизации пространственной компоновки схем усиления и обработки сигналов кремниевого преобразователя давления с целью уменьшения занимаемого объема с последующей трассировкой проводников и адаптацией линий связи, а также с целью повышения надежности всего модуля. Предложены различные модификации пространственных компоновок схем обработки сигналов датчиков давления, выполненных в виде микропроцессорных систем, состоящих из печатных модулей, систем на базе специализированных микроконтроллеров с размещением на керамической подложке и систем, реализованных с применением технологий трехмерной интеграции. Также рассматриваются способы решения задачи размещения элементов на ограниченной площади с оптимизацией по критериям минимальной суммарной длины соединений и минимального теплового перегрева. Выполняется анализ существующих алгоритмов размещения, методов расчета тепловых режимов приборов, модификаций генетических алгоритмов. Рассматривается вариант компоновки блока управления датчиком давления на основе генетического алгоритма. Также приводится пример модели теплового распределения. Моделирование теплового режима проводится на основе последовательного использования тепловых и математических моделей, соответствующих различным уровням иерархии электронной аппаратуры.*

**Ключевые слова:** датчик давления, трехмерная интеграция, микроплата, электронный модуль трехмерной компоновки.

**Введение.** Вопросы измерения давления возникают в самых различных областях науки и техники и касаются различных значений давления (от разрежения до высоких давлений) и различных величин (абсолютные, относительные или разностные величины давления). Достаточно большое число датчиков применяется в бортовом оборудовании систем управления авиационной и космической техники. К таким датчикам предъявляются высокие требования не только по точности и способности работать в критических условиях (температуры, перегрузки), но и по таким, весьма значимым в бортовом оборудовании характеристикам, как масса и габариты. С повышением требований к масса-габаритным характеристикам датчиков и с появлением новых методов интеграции от-

дельных блоков уменьшаются площадь и объем в общей конструкции датчиков, выделяемый для схемы обработки сигналов [1, 2].

От оптимизации расположения элементов зависит не только уменьшение занимаемого объема, последующая трассировка проводников и адаптация линий связи, но также и надежность всего электронного модуля, что объясняется наличием взаимного влияния (например, теплового) соседних элементов друг на друга. Так, недопустимый перегрев электронного компонента приводит к его отказу, а следовательно, и к отказу всего модуля. А в случае нежелательного теплового влияния на чувствительный элемент (ЧЭ) датчика давления появляется дополнительная погрешность измерений температуры.

Поэтому актуально решение задачи по определению такого взаимного расположения электронных элементов, которое было бы оптимально по принятым критериям. Основными метрическими критериями являются минимальная суммарная длина межсоединений, минимальная площадь (объем) области размещенных элементов, а также их производные. К топологическим критериям относят такие критерии, которые учитывают взаимное расположение элементов и соединений на коммутационном поле, например, близость расположения друг к другу тепловыделяющих элементов, минимум числа пересечений соединений и др.

Задачи конструкторско-технологического синтеза микромеханических сенсоров, как правило, являются *NP*-трудными. К классу таких задач относятся компоновка элементов по блокам, двумерное размещение элементов на печатных платах и БИС, синтез топологии сети межсоединений. Для перечисленных задач на достаточном уровне достигнута формализация и проведено множество исследований, широко освещенных в публикациях. При этом задача «теплового» размещения разногабаритных компонентов и чувствительных элементов в сенсорах с пространственной структурой (*3D*-сенсорах) является новой и мало исследованной. В большей мере, это следствие того, что *3D*-сенсоры появились на рынке относительно недавно, их разработка и производство еще не вышло на массовый уровень и, как следствие, еще отсутствует хорошо проработанная теоретико-математическая база, на которой бы основывались системы автоматизированного проектирования (САПР) модулей трехмерной компоновки.

Отсюда становится очевидной актуальность разработки новых методов для автоматизации конструкторского проектирования *3D*-сенсоров, встает проблема оптимизации размещения элементов в них, например, с учетом тепловых ограничений.

Целью работы является разработка метода решения задачи «теплового» размещения в *3D*-сенсорах для реализации их автоматизированного проектирования и повышения показателей их надежности на этапе проектирования.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи.

1. Анализ вариантов пространственной компоновки схем управления датчиков давления.

2. Анализ существующих алгоритмов размещения, методов расчета теплового режима приборов, модификаций генетических алгоритмов.

3. Выбор критерия оптимальности и разработка метода оценки получаемых решений на основе выбранного критерия.

4. Разработка модификации алгоритма, позволяющей наиболее эффективно решать задачу размещения элементов в 3D-сенсорах.

В процессе решения поставленных задач использовались основные положения математической физики (теория тепломассообмена), численные методы для расчета теплового распределения в 3D-сенсорах; элементы теории множеств; методы генетического поиска; объектно-ориентированное программирование для разработки программного приложения, реализующего алгоритм. Для анализа эффективности разработанных методов применяется численный эксперимент.

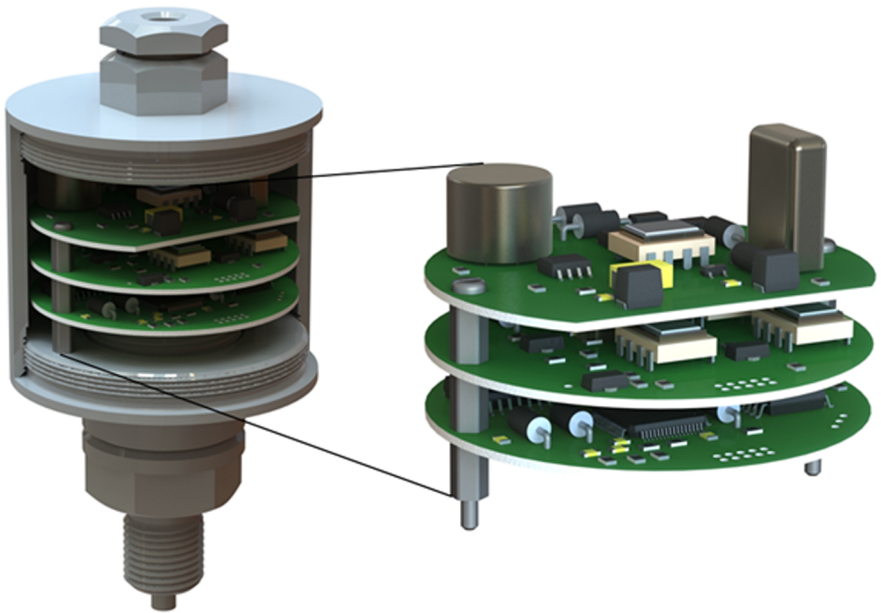
Научная новизна работы заключается в предложенном методе автоматизации размещения элементов в электронных модулях трехмерной компоновки на основе теплового критерия.

Практическая ценность работы заключается в возможности автоматизированного размещения элементов электронных модулей трехмерной компоновки (ЭМТК) по «тепловому» критерию. Это дает возможность сократить в целом время разработки конструкции ЭМТК датчиков давления. Выходные данные, формируемые программой, могут быть использованы в существующих конструкторских САПР трехмерного моделирования для создания трехмерной геометрической модели ЭМТК с целью детальной доработки конструкции, проведения инженерного анализа, формирования конструкторской документации.

**Варианты пространственной компоновки схем обработки сигнала датчика давления.** На рис. 1 изображена компоновка блока схемы усиления и обработки сигнала, состоящая из ячеек преобразователя напряжения, преобразователя интерфейсов и преобразователя сигналов ЧЭ, собранных на базе микропроцессора Миландр 1986ВЕ93У.

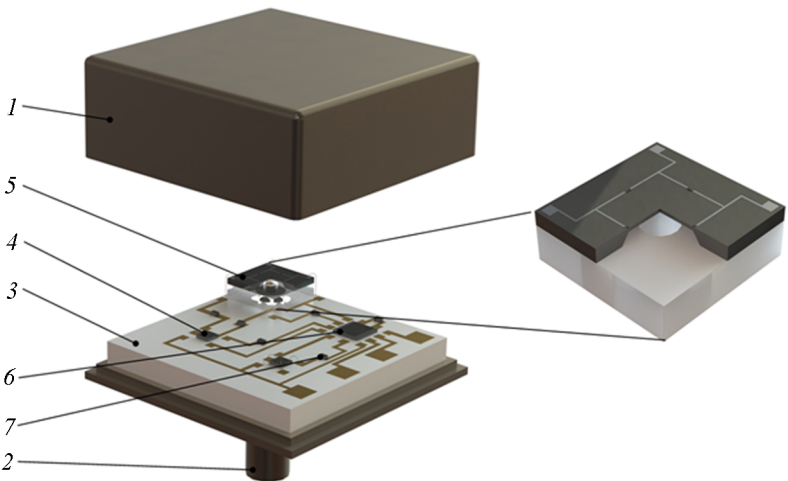
Данная схема обладает достаточно широким функционалом, но ее недостатком является большая масса и габариты (диаметр корпуса — 60 мм, масса датчика — примерно 750 г).

Используя технологии производства микросборок, можно минимизировать габаритные характеристики датчика. На базе бескорпусного микроконтроллера и элементов усиления возможно построение датчика по гибридной схеме компоновки.



**Рис. 1.** Вариант компоновки схемы на печатных модулях

Гибридная схема датчика давления (рис. 2) содержит базовые элементы для осуществления полной функции преобразования: мембрану чувствительного элемента со стеклянной подложкой; полную мостовую тензорезистивную схему; электронную схему на интегральных операционных усилителях; микроконтроллер для получения стандартного выходного сигнала, температурной компенсации, балансировки и т. д.



**Рис. 2.** Конструкция микросборки датчика давления

Конструкция состоит из крышки 1, трубки для подачи давления 2 и микроплаты в виде керамической подложки 3, на которой также расположены один или два операционных усилителя 4, выполненных на отдельных полупроводниковых пластинах, мембранный чувствительный элемент (ЧЭ) 5, изготовленный в виде отдельного элемента, микроконтроллер 6 и необходимые для работы схемы пассивные элементы 7.

На сегодняшний день для минимизации размеров с обеспечением высокого уровня функциональности и максимального быстродействия единственным средством остается применение 3D-интеграции для производства ЭМТК. Современные технологии трехмерной интеграции позволяют эффективно сократить площадь (объем, массу) электронного узла не за счет повышения степени интеграции ИС, а путем межсоединений элементов схемы (усилители, контроллеры, пассивные элементы).

Весь спектр технологий трехмерной интеграции можно разделить на три направления [1, 2]:

- SiP — system in package, система в корпусе;
- PoP — package on package, корпус на корпусе;
- TSV — through silicon vias, через кремниевые отверстия.

Технология SiP для производства микросборок довольно хорошо изучена и уже несколько лет используется в промышленности. Микроминиатюризация в данной технологии происходит за счет уменьшения толщины отдельных кристаллов, с увеличением количества кристаллов для повышения функциональности устройства.

Система «корпус на корпусе» является расширением технологии SiP и осуществляется за счет добавления технологии создания шариковых выводов.

Многокристалльные модули, использующие технологии создания межсоединений в виде переходных отверстий в материале полупроводниковых кристаллов, объединяются в пакет и соединяются через отверстия, заполненные металлом. На рис. 3 показан вариант компоновки системы с использованием технологии интеграции через отверстия в кристаллах.

На рис. 4 предложена конструкция датчика на базе бескорпусного кристалла микроконтроллера ZMD 31050. Датчик состоит из крышки 1, керамического основания 2 и штуцера для подвода давления 3.

ЭМТК измерительного блока состоит из кристалла микроконтроллера 4, устанавливаемого планарной стороной на промежуточный кристалл 5 в виде микроплаты. Промежуточный кристалл монтируется на ЧЭ с мембраной и расположенным на ней полным тензорезистивным мостом Уитстона. Кристалл ЧЭ устанавливается на подложку из боросиликатного стекла 7 и монтируется в керамический корпус.

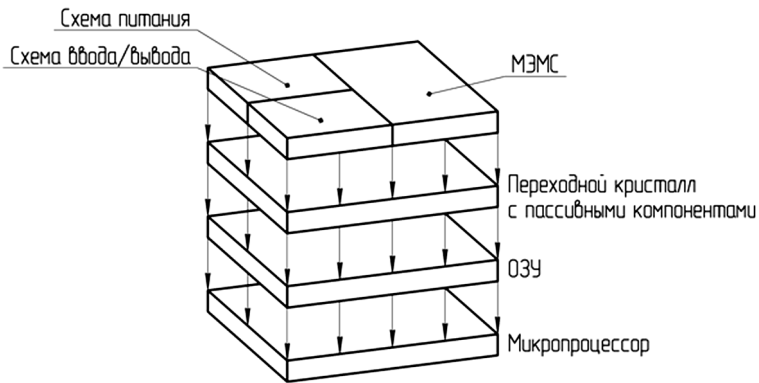


Рис. 3. Вариант компоновки системы датчика давления

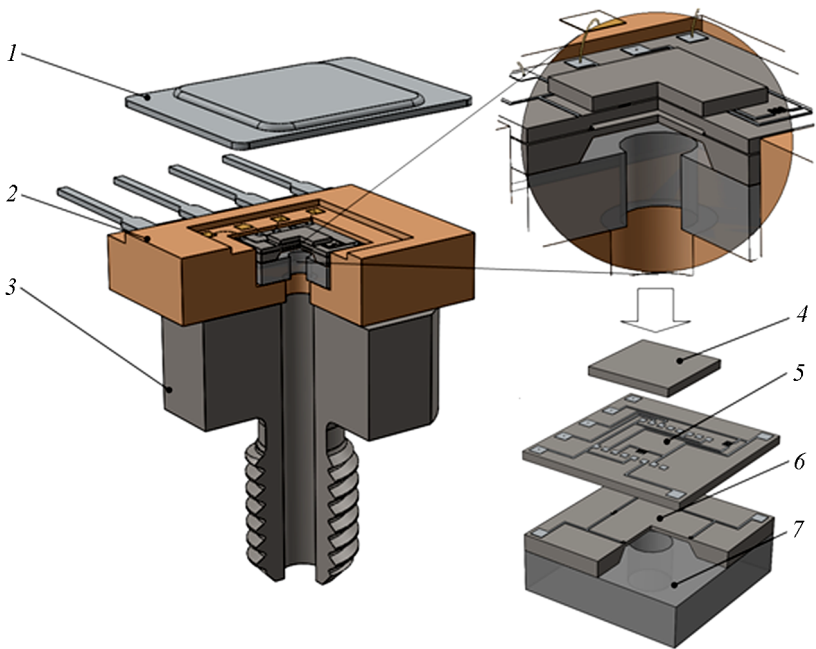


Рис. 4. Вариант конструкции датчика давления с использованием технологии трехмерной интеграции

Межсоединения организованны при помощи TSV технологии. Переходные отверстия сформированы в промежуточном кристалле 5. Также на нем располагаются необходимые для работы схемы пассивные компоненты (диффузионные резисторы, конденсаторы) и выполнена разводка микроконтроллера и чувствительного элемента.

**Компоновка блока управления датчиком давления на основе генетического алгоритма.** В [3, 4] предложено решение задачи компоновки элементов по отдельным платам и микроплатам на основе ин-



формации о связности элементов, их габаритах и взаимном расположении на принципиальной электрической схеме. Реализация метода компоновки подразумевает два последовательных этапа: предварительной компоновки и улучшения компоновки. На первом этапе в электрической схеме выделяются так называемые центры группирования — элементы, имеющие три и более выводов. Далее происходит составление групп — к каждому центру группирования по определенным правилам добавляются двухвыводные элементы, связанные непосредственно с ним по электрическим цепям. На этапе улучшения компоновки осуществляется уменьшение числа межгрупповых соединений и производится относительное выравнивание между собой площадей, занимаемых сформированными группами элементов.

После завершения компоновки всем группам присваиваются порядковые номера от 1 до  $n$ , где  $n$  — количество групп. Каждой микроплате также присваивается номер, совпадающий с номером размещаемой на ней группы элементов.

Предлагаемый способ компоновки обеспечивает такое разбиение множества элементов на группы, которое гарантирует, что все элементы группы «уместятся» в коммутационном поле микроплаты заданных размеров. Этот способ применяется для формирования исходных данных по разбиению элементов электрической схемы на отдельные группы. Имея данные о компоновке, можно проводить двумерное размещение каждой группы элементов в пределах своей микроплаты.

Поскольку процесс размещения элементов на коммутационном поле подразумевает определение конкретных координат расположения этих элементов, то необходимой составляющей исходных данных являются габаритные размеры микроплат и размещаемых элементов. Речь идет не только о параметрах длины и ширины, но и о высоте элементов и толщине микроплаты. При двумерном размещении используются только длина и ширина элемента и размеры коммутационного поля. Учет высоты элемента должен проводиться при выборе толщины микроплаты и при расчете температурного поля в конкретном варианте размещения. Если габариты всех электронных элементов являются фиксированными и заранее заданы (например, хранятся в базе данных), то габариты микроплаты определяются конструктором на этапе проектирования. Они могут ограничиваться размерами той области, в которую должен быть вписан ЭМТК. Таким образом, перед осуществлением генетического поиска конструктор должен задать габаритные размеры микроплаты.

К исходным геометрическим параметрам также следует отнести величину зазора  $\delta$  между микроплатами (она повлияет на общую длину модуля), минимально допустимый зазор между размещаемыми элементами, а также минимальное расстояние между элементом и краем микроплаты.

**Модели теплового распределения.** Моделирование процессов теплообмена в электронных устройствах является весьма сложной задачей. Это объясняется тем, что используемые модели должны быть достаточно общими и охватывать значительное многообразие конструкций, быть реализуемыми математически и в то же время адекватными изучаемым процессам, протекающим в конкретных объектах.

Для твердых тел наиболее полная математическая модель теплового режима объекта записывается в виде системы многомерных нестационарных уравнений теплопроводности

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \nabla(\gamma_i \nabla T_i) + q_{Vi}, \quad i = 1, \dots, I \quad (1)$$

с граничными условиями 1, 2, 3-го родов либо с условиями сопряжения на границах раздела элементов. В уравнении (1) использованы следующие обозначения:  $T_i$  — температура твердых тел;  $\tau$  — время;  $c$  — удельная теплоемкость;  $\rho$  — плотность;  $\gamma$  — теплопроводность;  $q_V$  — объемная плотность теплового потока;  $I$  — число тел. В еще более общем случае также рассматривают систему уравнений энергии для потоков теплоносителей [4]. Однако, поскольку в данной работе изучаются конструктивы, не содержащие теплоносителей, то в дальнейшем будем рассматривать математические модели только с точки зрения твердых тел.

Опыт расчетов теплового режима различных сложных объектов электроники (приборы, приборные комплексы) доказал эффективность подхода, называемого методом поэтапного моделирования [4]. В данном методе моделирование теплового режима проводится на основе последовательного использования тепловых и математических моделей, соответствующих различным уровням иерархии электронной аппаратуры. Иными словами, производится поэтапный переход от верхнего уровня иерархии, включающего группу приборов, к нижнему, имеющему в своем составе отдельные электронные компоненты.

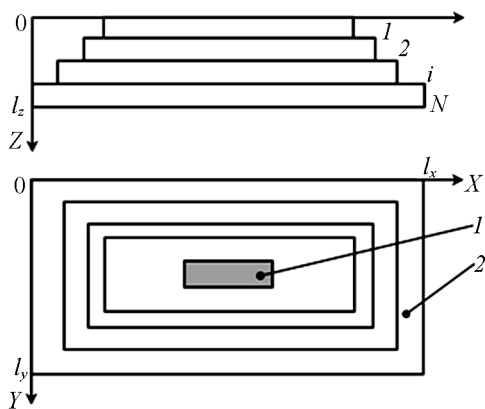
На первом этапе, как правило, ограничиваются анализом интегральных характеристик процессов теплообмена (значения среднеобъемных и среднеповерхностных температур, средних тепловых потоков). Их расчет производится на основе моделей с сосредоточенными параметрами. В данном случае математическое описание процессов теплообмена осуществляют системами алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений.

В случае, когда применение модели с сосредоточенными параметрами не позволяет получить необходимую информацию о тепловом режиме исследуемого объекта, усложняют анализ и переходят к одномерной модели. Применение одномерных моделей обосновано для тел,



у которых температурное поле имеет существенную неравномерность только по какой-то одной пространственной координате (в том числе и канонических тел), и эта неравномерность влияет на их функциональные характеристики. В случае расчета среднеповерхностных или среднеобъемных температур применение одномерных моделей позволяет уменьшить погрешность их определения.

На завершающих этапах теплового анализа при рассмотрении влияния отдельных электрокомпонентов друг на друга используют многомерные модели. Примером многомерной тепловой модели может являться кристалл, установленный на подложке, находящейся в корпусе. При этом модель представляется в виде системы прямоугольных параллелепипедов с поверхностным источником тепла (рис. 5).



**Рис. 5.** Тепловая модель в виде системы параллелепипедов: 1 — источник тепла; 2 — корпус

Такая модель, как правило, строится на основе нескольких допущений. Слои параллелепипеда моделируют кристаллы, соединительные слои припоя или клея, подложку, корпус [5]. Различные слои находятся в идеальном тепловом контакте. Толщина каждого слоя равна толщине соответствующей части конструкции. Тепловой поток от боковых поверхностей пренебрежимо мал.

**Выводы.** Существует ряд вариантов трехмерной компоновки схем обработки и усиления сигнала чувствительных элементов датчиков давления. В случае схемы управления на печатных модулях компоновка с учетом теплового распределения влияет на надежность работы схемы, тогда как в случае трехмерной интеграции ЭМТК необходима оценка влияния источников нагрева на величину температурной погрешности измерения давления.

Для расчета теплового распределения внутри ЭМТК используется линейное стационарное уравнение теплопроводности и ряд граничных условий.

*Отдельные результаты работы получены в рамках исследований по госзаданию №7.6161.2011 «Гибридные чувствительные элементы интеллектуальных сенсоров распределенных управляющих систем».*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Хохлун А. 3D-интеграция — один из возможных путей опережающего развития отечественной микроэлектроники. *Компоненты и технологии*, 2010, № 12, с. 148–150.
- [2] Васильев А., Современные технологии 3D-интеграции. *Компоненты и технологии*, 2010, № 1, с. 156–158.
- [3] Новиков И.С., Шахнов В.А. Оптимизация конструкции электронных модулей трехмерной компоновки по тепловому критерию. *Проектирование и технология электронных средств*, 2007, № 3, с. 31–37.
- [4] Новиков И.С., Шахнов В.А. Теоретические аспекты оптимизации теплового режима трехмерных электронных модулей посредством генетического алгоритма. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2009, № 1, с. 112–123.

Статья поступила в редакцию 16.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Андреев К.А., Власов А.И., Камышная Э.Н., Тиняков Ю.Н., Лавров А.В. Автоматизированная пространственная оптимизация компоновки блока управления датчика давления по тепловому критерию. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/814.html>

**Андреев Константин Александрович** окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010 г., лаборант-исследователь НОЦ «Наносистемы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер испытательной лаборатории ЗАО «ИЛФОРМ», аспирант кафедры «Конструирование и производство электронной аппаратуры». Области научных интересов: проектирования ЭВС, датчики давления, МЭМС. e-mail: kost87@mail.ru

**Власов Андрей Игоревич** окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1994 г. Канд. техн. наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой «Конструирование и производство электронной аппаратуры» по научной работе МГТУ им. Н.Э. Баумана. Области научных интересов: микропроцессорные средства для цифровой обработки сигналов, схематехника и элементная база вычислительных систем, применение нейрокомпьютеров, САПР, сетевые технологии, построение экспертных систем, автоматизация проектирования и управления. Автор более 100 опубликованных научных работ. e-mail: vlasov@iu4.ru

**Камышная Эмилия Николаевна** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Конструирование и производство электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: автоматизированное проектирование электронных средств.

**Тиняков Юрий Николаевич** окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1976 г. Ведущий инженер НОЦ «Наноинженерия» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: микроэлектромеханические приборы. e-mail: tinjakov48@mail.ru

**Лавров Алексей Васильевич** окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1979 г. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Конструирование и производство электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Области научных интересов: конструирование РЭА, специализация — микроволновые устройства. e-mail: lada\_lav@list.ru