

24. Process to Realise a Cantilever on Fabric Using a Piezoelectric Layer to Detect Motion for Wearable Applications // *Sens. Actuators*. – 2013. – Vol. 203. – P. 241-248.
25. *Freund L.B., Suresh S.* Thin Film Materials: Stress, Defect Formation and Surface Evolution. Cambridge: Cambridge University Press 2003. – 802 с.
26. *Janssen G.C., Dammers A.J.* Tensile stress in hard metal films // *Appl. Phys. Lett.* – 2003. – Vol. 83, № 16. – P. 3287-3289.
27. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Под ред. В.Е. Панина. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.
28. *Huang Z.Y., Hong W.* Nonlinear analyses of wrinkles in a film bonded to a compliant substrate // *J. Mech. Phys. Solids*. – 2005. – Vol. 53, № 9. – P. 2101-2118.
29. *Pang Y, Huang R.* Nonlinear effect of stress and wetting on surface evolution of epitaxial thin films // *Phys. Rev. B*. – 2006. – Vol. 74, № 7.
30. *Huang R., Stafford C.M., Vogt B.D.* Effect of surface properties on wrinkling of ultrathin films // *J. Aerospace Eng.* – 2007. – Vol. 20, № 1. – P. 38-40.
31. *Huang R.* Dynamics of wrinkle growth and coarsening in stressed thin films // *Phys. Rev. E*. – 2006. – Vol. 74, № 2.
32. *Сергеев В.В.* Напряжения и деформации в элементах микросхем. – М.: Радио и связь, 1988.
33. *Михайлов П.Г., Ожикенов К.А.* Механические и тепловые деформации в микромеханических структурах сенсорных элементов // *Известия Национальной академии наук Республики Казахстан Серия физико-математическая*. – 2014. – № 4. – С. 163-168.
34. *Amarasinghe, R.* Design and fabrication of miniaturized six-degree of freedom piezoresistive acceleromete // *MEMS 2005: 18th IEEE International Conference on microelectromechanical systems*. – P. 351-354.
35. *Chen Po-Jui, Rodger D. C., Humayun M. S.* Unpowered spiral-tube parylene pressure sensor for intraocular pressure sensing // *Sensors and Actuators Physical*. – 2006. – № 127. – P. 276-282.
36. *Михайлов П.Г.* Методы управления механическими напряжениями в сенсорных элементах и системах микроэлектронных датчиков // *Датчики и системы*. – 2004. – № 9. – С. 10-12.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. М.Ю. Звездина.

Михайлов Петр Григорьевич – Пензенский государственный технологический университет; e-mail: petr.mixajlov.49@mail.ru; г. Пенза, Байдукова пр-д, 1а; тел.: 89273288810; ген. директор ООО НПЦ «КИТ»; кафедра ИТС; д.т.н.; профессор.

Мокров Евгений Алексеевич – e-mail: kitem-12@mail.ru; гл. конструктор ООО НПЦ «КИТ»; кафедра приборостроения; д.т.н.; профессор.

Mikhailov Peter Grigor'evich – Penza State Technological University; e-mail: pit_mix@mail.ru; 1a, Baidukov pr., Penza, Russia; phone: +79273288810; generally director NPTS "KIT"; dr. of eng. sc.; professor.

Mokrov Evgeni Alexandrovich – e-mail: kitem-12@mail.ru; ch. designer NPTS "KIT" dr. of eng. sc.; professor

УДК 621.315.592:546.28

К.А. Ожикенов, П.Г. Михайлов, А.О. Касимов, А.У. Аналиева **УЗЛЫ И КОМПОНЕНТЫ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ***

Без датчиков и измерительных преобразователей невозможно создавать современные объекты и системы в различных областях науки, техники и технологии. Особую роль в настоящее время играют новое поколение датчиков – микроэлектронные, которые изго-

* Статья подготовлена в рамках выполнения проекта «Разработка беспроводной распределенной системы мониторинга загрязнения сбросовых сточных вод антибиотиками и агрессивными лекарственными препаратами», в соответствии с Приказом Председателя Комитета науки МОН РК №17-нж от 08.04.2013 г.

тавливаются с использованием целого ряда групповых технологий микроэлектроники: твердотельной, микромеханической, тонко-и толстопленочной и проч. [1, 2]. Освоение массового производства микроэлектронных датчиков (МЭД) физических величин для автомобилей позволило увеличить их безопасность, экономичность и значительно улучшить потребительские свойства. Благодаря автомобильным датчикам, микроэлектронные технологии изготовления датчиков начали стремительно развиваться в сторону повышения точности, надежности и уменьшения габаритов. Развитие мобильной телефонии, планшетных компьютеров и проч. повысило спрос на акселерометры, гироскопы [3, 4]. В тоже время, в технологиях производства МЭД есть критические операции, которые зачастую затрудняют проводить «сквозные» групповые операции изготовления датчиков. К таким операциям, в первую очередь относятся сборочные операции и операции настройки датчиков [5, 6]. Кроме того, принятая на практике технология изготовления МЭД на российских предприятиях, которая включает полное изготовление всего датчика и его компонентов и узлов используя собственную технологическую базу, не способствует снижению цены и повышению конкурентоспособности. Более прогрессивной и менее затратной технологией является сборочное производство с использованием кооперации, при которой основные узлы датчиков чувствительные элементы (ЧЭ), измерительные модули (ИМ) и электронные преобразователи (ЭП) изготавливаются на высокотехнологичных предприятиях и поставляются как комплектующие. При этом сборка и настройка всего датчика может производиться в условиях практически любого предприятия, оснащенного минимальным набором испытательного оборудования, в том числе и на малых предприятиях. Поэтому технологии модульной сборки МЭД является прогрессивным и востребованным направлением.

Микроэлектроника; датчик; чувствительный элемент; измерительный модуль; компонент; узел; кооперация; сборка.

K.A. Ozhikenov, P.G. Mikhailov, A.O. Kasimov, A.U. Analieva

PARTS AND COMPONENTS OF MICROELECTRONIC SENSORS

Without sensors and transducers it is impossible to create modern facilities and systems in various fields of science, engineering and technology. A special role is now played by a new generation of sensors - microelectronics, which are made using a variety of group technology of microelectronics: solid, micromachining, thin-and thick-film and so on. [1, 2]. The development of mass production of microelectronic sensors (MES) of physical quantities for cars allowed to increase their safety, efficiency and significantly improved consumer properties. Due to road sensors, microelectronic sensor technology began to evolve rapidly towards improving the accuracy, reliability, and reduce the size. The development of mobile phones, tablet computers and so on. increased demand for accelerometers, gyroscopes [3, 4]. At the same time, production technology has MES critical operations, which are often difficult to carry out "cross-cutting" group operations manufacture sensors. These transactions primarily include assembly operations and the setting operation of sensors [5, 6]. In addition, the practice adopted by the manufacturing technology MES at Russian enterprises, which includes the complete production of the entire sensor and its components and assemblies using its own technological base, not to reduce prices and increase competitiveness. A more progressive and less costly technology is assembling production with cooperation, in which the main components are sensitive sensor elements (SE), measurement modules (MM) and electronic transformers (ET) are produced on high-tech enterprises and are available as accessories. At the same time the assembly and adjustment of all the sensor can be made in virtually any business environment, equipped with a minimal set of test equipment, including small businesses. Therefore modular assembly technology MES is a progressive and popular destination.

Microelectronics; sensor; sensor; measuring module; component; assembly; cooperation; assembly.

К узлам и компонентам МЭД принято относить ЧЭ и ИМ [7, 8], которые являются основными структурными единицами, в наибольшей степени определяющими метрологические характеристики датчиков.

В настоящее время новым направлением в сфере создания измерительной аппаратуры является производство датчиков на основе готовых ЧЭ и ИМ, поставляемых по кооперации [9, 10]. Такая методология предполагает использование покупных ЧЭ и ИМ, изготавливаемые на предприятиях, обладающих технологическими и кадровыми компетенциями в сфере микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Такая методология позволяют достичь определенных преимуществ, основными из которых являются [11–13]:

- ◆ резкое сокращение времени на разработку и модернизацию датчиков, путем использования базовых ЧЭ и ИМ со стандартными посадочными размерами, которые устанавливаются в корпуса датчиков различной конфигурации;
- ◆ значительно сократить трудоемкость изготовления датчиков за счет исключения операций настройки ЧЭ и ИМ;
- ◆ уменьшить себестоимость датчиков и систем на их основе;
- ◆ снизить требования к квалификации рабочих;
- ◆ расширить номенклатуру выпускаемых датчиков;
- ◆ обеспечить высокую временную и параметрическую стабильность датчиков;
- ◆ упростить стыковку первичных преобразователей с электроникой за счет унификации выходных сигналов ЧЭ и ИМ;
- ◆ повысить эксплуатационную надежность ДПА за счет высокой, изначально гарантированной, надежности ЧЭ и ИМ;
- ◆ провести оптимизацию конструктивного исполнения узлов ИМ для обеспечения автоматизированной сборки датчиков.

ЧЭ и ИМ представляют собой функционально и конструктивно законченные изделия, которые изготавливаются известными на мировом рынке фирмами (*Trafag, Kulite, Kistler, Endevco*), имеющими высокотехнологичное оборудование и значительный опыт в области производства МЭМС-изделий. Для стабилизации характеристик ЧЭ и ИМ, в процессе производства их подвергают длительным и разнообразным технологическим тренировкам, которые, с одной стороны, способствуют отбраковки потенциально ненадежных компонентов, а, с другой, обеспечивают высокую временную стабильность за счет ускоренного прохождения периода приработки, характеризующегося высокой интенсивностью отказов.

Что касается производителей и номенклатуры ЧЭ и ИМ, то следует отметить, что из отечественных производителей такие компоненты выпускает только технологический центр МИЭТ, но и их качество не совсем удовлетворяет потребителей. Основной объем ЧЭ и ИМ поставляется из-за границы напрямую или через российских посредников. Номенклатура представленных на рынке зарубежных ЧЭ и ИМ позволяет реализовывать все типы датчиков давления: абсолютного, дифференциального, избыточного с выходными сигналами в виде напряжения.

Представим результаты обзора и анализ ЧЭ и ИМ, представленных на российском рынке отечественными и зарубежными производителями (табл. 1) [10, 14].

Потребность в надежных и взаимозаменяемых датчиках, созданных на базе стандартных ЧЭ и ИМ существует в таких областях как:

- ◆ ракетно-космическая техника и авиация;
- ◆ военная техника;
- ◆ судостроение;
- ◆ топливно-энергетический комплекс;
- ◆ атомная энергетика;
- ◆ научные и прикладные исследования.

Кратко рассмотрим базовые конструкции и особенности ЧЭ и ИМ, изготавливаемыми различными отечественными (рис. 1–6) и иностранными (рис. 7) фирмами [10, 14].

Принятыми на практике конструктивными исполнениями полупроводниковых ЧЭ (иногда их, как принято в микроэлектронике, называют кристаллами) являются плоские или профилированные круглой, квадратной и реже прямоугольной формы. Из них наиболее технологичными для дальнейшей сборки датчика являются квадратные профилированные ЧЭ, хотя с точки зрения минимизации размеров наиболее предпочтительными являются круглые профилированные (рис. 1, 2).

Таблица 1

Основные технические характеристики ЧЭ и ИМ отечественного и иностранного производства

Производитель	Основные технические характеристики						
	Тип и диапазон измеряемого давления, МПа	Номинальный выходной сигнал, мВ	Начальный выходной сигнал мВ/В	Рабочий диапазон температур, °С	Долговременный дрейф, мВ/год	Тип тензоструктуры	Габариты, мм
ЧЭ и ИМ отечественного производства							
НПК «ГЦ» Зеленоград	АД, ИД, 0,06...2,5	100	3	-50 +80	1	<i>p-n</i>	ЧЭ: 4x4; ИМ: 4x4; Ø 13
ЗАО "Орлекс"	ИД, 0,5...25,0	50-100	5	-50 +80	-	КНС	Ø 20
ОАО "Орбита"	АД, 0,06...2,5	100-150	5	-50 +150	2	<i>p-n</i>	кристалл: 4x4
ЧЭ и ИМ иностранного производства							
"Kulite"	АД, ИД, 0,02...60,0	30-100	-	-50 +80	0,5	<i>p-n</i> , КНД	кристалл: 1x1
"Endevco"	ИД, 0,02...25,0	100-250	-	- 50...+250	-	<i>p-n</i>	кристалл: Ø 2 – 5
"Edress+Hauser"	АД, ИД, 0,06...100,0	50-100	-	-50 +150	1,0	<i>p-n</i> , поли-Si	ЧЭ: 4x4...6x6; ИМ: 4x4, 6x6; Ø 15

Следует отметить, что, так как ЧЭ спроектированы и изготавливаются с применением групповых технологий с довольно высоким процентом выхода годных, то их стоимость довольно низкая, поэтому полупроводниковые датчики давления являются относительно дешевыми комплектующими изделиями.

«Особняком» в части возможности изменения толщины упругого элемента и, соответственно, диапазона измерения являются ЧЭ на основе структур кремния на сапфире (КНС). В таких ЧЭ изменение диапазона измерения давления производится путем изменения толщины воспринимающего элемента – упругой металлической мембраны, которая через шток передает усилие ЧЭ.

Для особо ответственных изделий используются высокоточные металлопленочные датчики емкостного и тензометрического принципов преобразования. Такие датчики являются особо устойчивыми по отношению к вибрациям, термоударам, агрессивным средам [14–16].

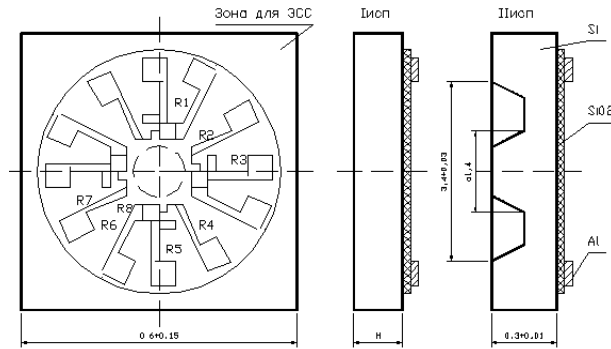


Рис. 1. Двухканальный полупроводниковый ЧЭ с жестким центром и зоной под электростатическое соединение (ЭСС): $R1 \dots R4 = 500 \text{ Ом} \pm 15\%$, $\rho_S = 11 \pm 1 \text{ Ом/см}$; $h = 20 \dots 260 \text{ мкм}$; $H = 15 \dots 260 \text{ мкм}$

Металлические ЧЭ в подавляющем большинстве изготавливаются в виде сложнопрофилированной балки или мембраны (рис. 3). Металлические ЧЭ не предусматривают применения групповых технологий, поэтому цена их на порядок выше, чем у полупроводниковых, а соответственно и металлопленочные датчики давления являются дорогими изделиями и их применение ограничено, в основном ответственными и особо важными объектами (ракеты, авиационные двигатели и проч.).

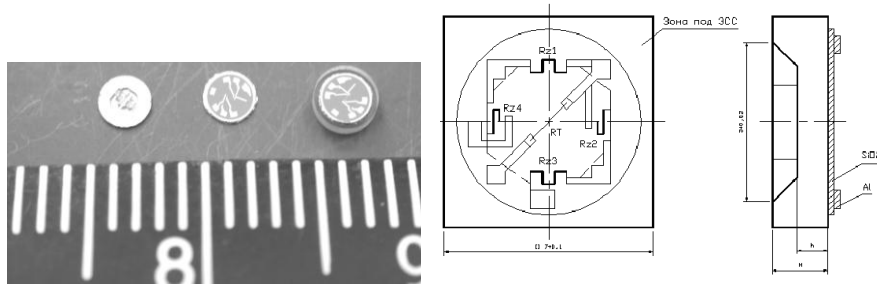


Рис. 2. Полупроводниковый ЧЭ с профилированным упругим кремниевым элементом, тензо- и терморезисторами: а – топология, б – внешний вид

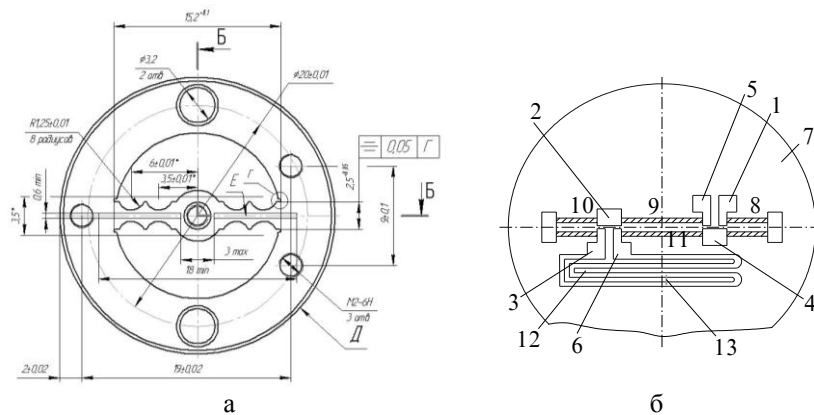


Рис. 3. Металлопленочный ЧЭ датчика давления: а – балочного, б – мембранного типов (1...6 – контактные площадки, 7 – мембрана, 8...11 – тензорезисторы, 12 – термокомпенсационный резистор, 13 – перемычка)

Следующими по сложности и конструктивной готовности, вслед за ЧЭ компонентами для датчиков являются измерительные модули [17–19], изображенные на рис. 4–6, которыми могут комплектоваться датчики давления с различными конфигурациями корпусов.

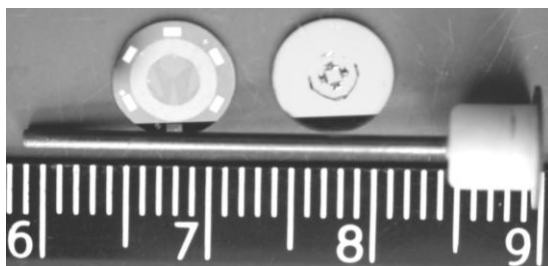


Рис. 4. Фотография ЧЭ и ИМ полупроводникового датчика давления с высоколегированными проводниками, заглубленными в кремний

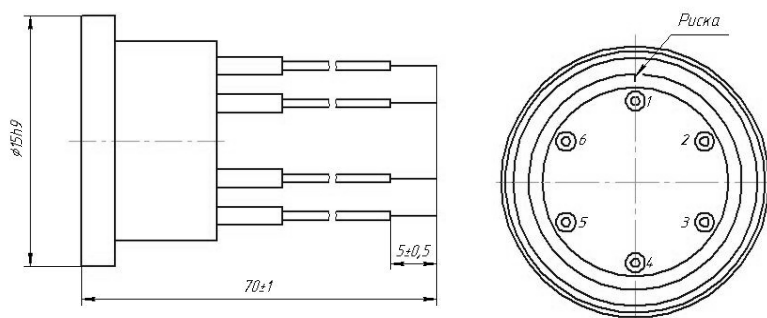


Рис. 5. Герметизированный измерительный модуль пьезорезисторного датчика избыточного давления

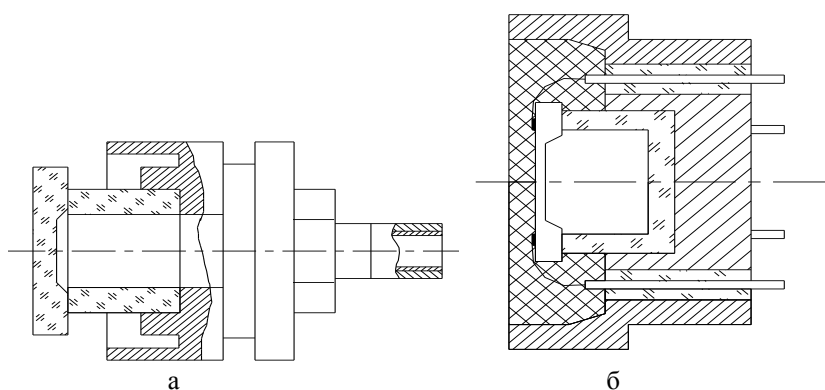


Рис. 6. Конструкции измерительных модулей датчиков избыточного (а) и абсолютного (б) давлений

К общим недостаткам отечественных ЧЭ и ИМ является их недостаточная временная стабильность технических характеристик, которая обусловлена дефектами структур, а также малым временем стабилизации параметров и щадящими режимами процесса стабилизации.

Кроме того, отсутствуют адекватные математические модели процессов стабилизации параметров, основанных на формализации физико-химических процессах, протекающих в элементах и структурах ЧЭ и ИМ. На практике основной моделью, используемой в назначении режимов стабилизации, в частности, термотренировок, является формула Аррениуса [20].

Поэтому отечественные фирмы в подавляющем большинстве поставляют зарубежные ЧЭ и ИМ под своей маркой. Исключением являются ЧЭ и ИМ на основе структур КНС, которые производятся из отечественных пластин с уже заданными электрофизическими характеристиками (рис. 7) [21].

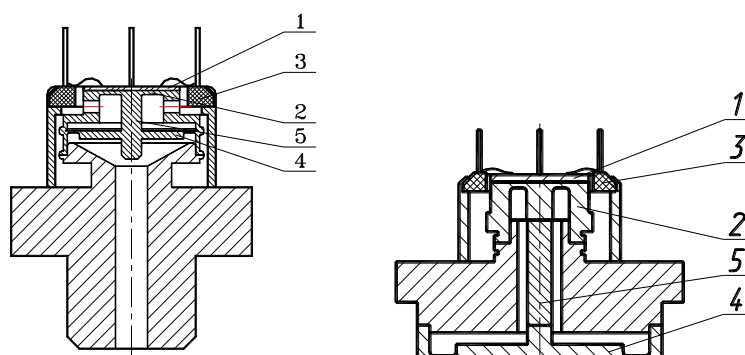


Рис. 7. Измерительные модули тензорезистивных датчиков давления на основе структур КНС: 1 – ЧЭ (КНС), 2 – металлическая измерительная мембрана, 3 – контактная колодка, 4 – разделительная металлическая мембрана, 5 – шток

Как показали поисковые исследования, на рынке датчиков в настоящее время представлены несколько типов зарубежных ИМ 100% готовности по достаточно приемлемым ценам (рис. 8). ИМ поставляются протестированными, прошедшими достаточно жесткие тренировки, включая термошоковые, вибро и гидравлические нагрузки достаточно высокой длительности. При ускоренных испытаниях выявляются скрытые дефекты и несовершенства в чувствительных элементах ИМ, что позволяет отбраковывать потенциально ненадежные ИМ.



Рис. 8. Зарубежные измерительные модули 100 % готовности: а – тонкопленочный ИМ фирмы «Trafag»; б – МРМ280-03-G-0-L-1 модуль относительного давления, в – МДМ290 модуль дифференциального давления

Устанавливая стандартизованные ИМ в датчики различной конфигурации, можно получить целую гамму датчиков абсолютного, дифференциального, относительного и избыточного давления. При этом, хотя изготовитель не указывает величину радиационной стойкости ИМ, можно предположить, что самыми стойкими являются тонкопленочные, в меньшей мере толстопленочные, а самыми малостойкими являются пьезорезисторные ИМ.

Как показала практика, использование покупных ИМ позволяет в значительной мере снизить себестоимость и трудоемкость изготовления датчиков в целом. С использованием унифицированных ЧЭ и ИМ были изготовлены датчики давления, показавшие при испытаниях ракетно-космической техники высокие эксплуатационные показатели (рис. 9, 10) [22–25].

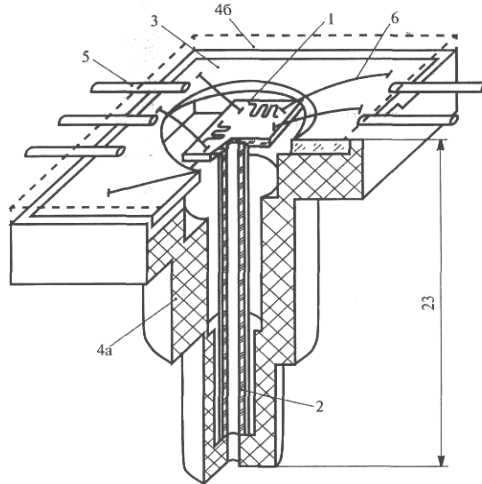


Рис. 9. Совмещенный датчик давления и температуры: 1 – ЧЭ, 2 – стеклокапилляр, 3 – компенсационная плата, 4а – корпус, 4б – крышка, 5 – электрические выводы, 6 – проволочные выводы

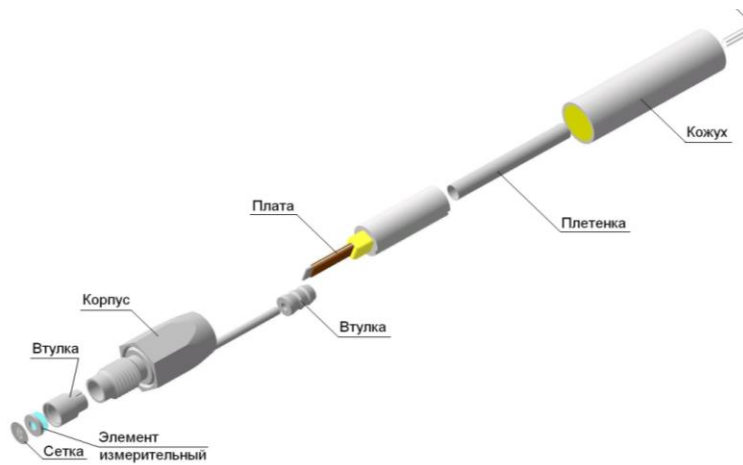


Рис. 10. Миниатюрный датчик акустического давления с использованием унифицированного полупроводникового ЧЭ

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Распопов В.Я.* Микромеханические приборы: Учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
2. *Михайлов П.Г.* Микромеханические устройства и приборы: Учебное пособие. – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2007. – 174 с.
3. *Amarasinghe R.* Design and fabrication of miniaturized six-degree of freedom piezoresistive accelerometer MEMS 2005: 18th IEEE International Conference on microelectromechanical systems. – P. 351-354.

4. *Джексон Р.Г.* Новейшие датчики. Справочник: Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2007. – 380 с.
5. *Михайлов П.Г.* Микроэлектронные датчики, особенности конструкций и характеристик // Приборы и Системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 6. – С. 38-42.
6. *Михайлов П.Г., Лапшин В.И., Сергеев Д.А.* Моделирование и конструирование кремниевых чувствительных элементов емкостных датчиков давлений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5 (142). – С. 128-133.
7. ГОСТ Р 51086-97 Датчики и преобразователи физических величин электронные. Термины и определения. Госстандарт России ИПК Издательство стандартов, 1997.
8. ГОСТ Р 8.673-2009 ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. Госстандарт России ИПК Издательство стандартов 2009 г.
9. Микроэлектроника и прецизионные датчики. Обзор фирмы Honeywell <http://www.favorit.ru/files/catalog/Honeywell/Honeywellmicroelectronicsoverview.pdf>.
10. Проспекты и каталоги фирм: “PCB Piesotronics, JNG”, “Sunstrand Data Control”, “DYTRAN”, “Hans List”, “Kistler Instrumente, AG”, “Vibro-meter”, “Millard LTD”, “Motorolla JNC”, “AVL”, “Kulite”, “Erich Brosa”.
11. *Михайлов П.Г., Соколов А.В., Сергеев Д.А.* Вопросы применения чувствительных элементов и измерительных модулей в датчиках физических величин // Информационно-измерительная техника: Межвузовский сборник научных трудов. Вып. 37. – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2012.
12. *Михайлов П.Г., Варламов А.В.* Микроэлектронные датчики. Разработка и проектирование // Датчики и Системы. – 2007. – № 8. – С. 23-26.
13. *Михайлов П.Г., Мокров Е.А.* Микроэлектронные датчики: особенности конструкций и характеристик // Электронные компоненты. – 2006. – № 5. – С. 12-15.
14. Каталоги фирм ОАО «НИИФИ», ЗАО «Орлекс», ОАО «Орбита», НПК «ТЦ», «Trafag», «Kulite», «Endevco», «Edress+Hauser».
15. *Джексон Р.Г.* Новейшие датчики. Справочник: Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2007. – 380 с.
16. *Фрайден Дж.* Современные датчики. Справочник: Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2005. – 588 с.
17. *Михайлов П.Г., Маринина Л.А., Смирнов И.Ю., Сергеев Д.А.* Чувствительные элементы и измерительные модули датчиков. Конструкции и технологии Современные информационные технологии: Труды МНТК СИТ. Вып. 13. – Пенза: ПГТА, 2011. – С. 22-25.
18. *Козин С.А., Баринев И.Н.* Микроэлектронные датчики физических величин на основе МЭМС-технологий // Компоненты и технологии. – 2010. – № 1. – С. 24-25.
19. *Chen Po-Jui, Rodger D.C., Humayun M.S. and Tai Yu-Chong.* Unpowered spiral-tube parylene pressure sensor for intraocular pressure sensing Sensors and Actuators A: Physical. – March 2006. – 127, Issue 2. – P. 276-282
20. Stephen Beeby MEMS Mechanical Sensors / Stephen Beeby, Graham Ensell, Michael Kraft, Neil White // Boston, London, 2004: Artech House, Inc. – P. 128.
21. *Мартынов Д.Б., Стучебников В.М.* Температурная коррекция тензопреобразователей давления на основе КНС // Датчики и Системы. – 2002. – № 10. – С. 6-12.
22. *Михайлов П.Г.* Микроэлектронный датчик давления и температуры // Приборы и Системы. // Управление, контроль, диагностика. – 2003. – № 11. – С. 29-31.
23. *Михайлов П.Г., Козин С.А.* Интегральный полупроводниковый преобразователь давления // Патент РФ № 1527526 БИ № 45, 1989.
24. *Ожикенов К.А., Михайлов П.Г., Касимов А.О., Скотников В.В.* Использование обратных преобразователей в микроэлектронных датчиках // Вестник НАН РК. – 2014. – № 6. – С. 41-46.
25. *Ожикенов К.А., Михайлов П.Г., Касимов А.О., Петрин В.А., Маринина Л.А.* Общие вопросы моделирования компонентов и структур микроэлектронных датчиков // Вестник НАН РК. – 2014. – № 6. – С. 62-71.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. М.Ю. Звездина.

Ожикенов Касымбек Адильбекович – Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева; e-mail: kas_ozhiken@mail.ru; 050013, г. Алма-Ата, ул. Сатпаева, 22а; тел.: 87012237538, 87073357729; кафедра робототехники и технических средств автоматизации; зав. кафедрой; к.т.н.

Касимов Абдуразак Оразгелдиевич – e-mail: 64razak@mail.ru; тел.: 87017423095; кафедра радиотехники, электроники и телекоммуникации; зав. кафедрой; к.т.н.

Михайлов Петр Григорьевич – Пензенский государственный технологический университет; e-mail: pit_mix@mail.ru; г. Пенза, пр-д Байдукова, 1а; тел.: 89273288810; д.т.н., профессор.

Аналиева Ажар Уразбаевна – e-mail: Eazhara_1980@mail.ru; аспирант.

Ozhikenov Kasymbek Adilbekovich – Kazakh National Technical University. K.I. Satpayev; e-mail: kas_ozhiken@mail.ru; 22A, Satpayev street, Alma-Aty, 050013; phone: +77012237538, +77073357729; the department of robotics and automation of technical equipment; head of department; cand. of eng. sc.

Kasimov Abdurazak Orazgeldievich – e-mail: 64razak@mail.ru; phone: +77017423095; the department of radio engineering, electronics and telecommunications; head of department; cand. of eng. sc.

Mikhailov Peter Gavrilovich – Penza State Technological University; e-mail: pit_mix@mail.ru; 1A, pr. Baidukov, Penza, Russia; phone: +79273288810; dr. of eng. sc.; professor.

Analieva Urazbaevna Azhar – e-mail: Eazhara_1980@mail.ru; postgraduate student.

УДК 004.942

О.Ю. Воронков, С.А. Синютин

МЕТОД СОЗДАНИЯ МАКРОМОДЕЛЕЙ МЭМС В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ ANSYS

Описывается роль макромоделей (моделей пониженного порядка) в проектировании и испытаниях МЭМС, поясняются их преимущества по сравнению с полными моделями метода конечных элементов (МКЭ) для поведенческого моделирования динамических характеристик МЭМС в реальном времени и гибких исследований свойств полученных объектов. Приводится математическая интерпретация процедуры понижения порядка системы уравнений динамики путём перехода от полной модели, представленной в форме уравнений в переменных состояния, к уравнениям в переменных состояния макромоделей. В обобщённой форме излагается компьютерный метод формирования макромоделей в программе ANSYS на базе исходных полных моделей МКЭ со снижением требований к мощности ЭВМ и сохранением точности оригинальной модели для последующего экспорта матриц массы, жёсткости, демпфирования и пр. в программу MatLab в целях моделирования динамики МЭМС. Описываются и графически иллюстрируются четыре основных этапа работы над макромоделью в системе ANSYS: подготовка модели, этап создания, этап использования и этап расширения. Указываются взаимосвязь этих этапов, результирующие файлы, получаемые в конце каждого этапа и требуемые для дальнейшей работы, раскрывается понятие связанного анализа, обозначается возможность дальнейшей отправки результатов расчёта в систему MatLab. Актуальность работы заключается в необходимости поведенческого моделирования динамики МЭМС в реальном времени для тщательной проверки работоспособности объектов, что трудноосуществимо с применением полных моделей МКЭ по причине их громоздкости, а значит, затрат большого объёма компьютерных ресурсов. Научная новизна результатов состоит в пошаговом описании алгоритма построения макромоделей МЭМС на основе полной модели МКЭ для возможного последующего преобразования данных в формат MatLab Simulink.

Микроэлектромеханическая система; метод конечных элементов; макромодель; ANSYS; MatLab; база данных.