

**GENERAL ISSUES OF SIMULATION OF COMPONENTS  
AND STRUCTURES OF MICROELECTRONIC SENSORS****K. A. Ozhikenov<sup>1</sup>, P. G. Mikhailov<sup>2</sup>, A. O. Kassymov<sup>1</sup>, V. A. Petrin<sup>3</sup>, L. A. Marinina<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Kazakh National Technical University after K.I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan<sup>2</sup>Penzen's State Technological University, Penza, Russia<sup>3</sup>Penza State University, Penza, Russia**Key words:** Sensors of physical sizes, mathematical model, dynamic model, the sensitivity, accuracy.**Abstract.** Terminological aspects of simulation are given, the stages of development of microelectronic sensors of physical quantities are regarded. In the simulation the principle level of synthesis models, based on the hierarchy structure of the sensor, is used. The algorithm of synthesis models is presented. Developed in the research of physical and mathematical models of microelectronic sensors are shown.

УДК 681.527.72

**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ  
И СТРУКТУР МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ****К. А. Ожикенов<sup>1</sup>, П. Г. Михайлов<sup>2</sup>, А. О. Касимов<sup>1</sup>, В. А. Петрин<sup>3</sup>, Л. А. Маринина<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Казахский Национальный технический университет им. К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан;<sup>2</sup>Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия;<sup>3</sup>Пензенский государственный университет, Пенза, Россия**Ключевые слова:** датчики физических величин, математическая модель, динамическая модель, чувствительность, погрешность.**Аннотация.** Приведены терминологические аспекты моделирования, рассмотрены этапы разработки микроэлектронных датчиков физических величин. При моделировании использован уровневый принцип синтеза моделей, основан на иерархии структуры датчика. Приведен алгоритм синтеза моделей. Показаны разработанные в процессе исследований физико-математические модели микроэлектронных датчиков.

Для правильного определения стратегии моделирования рассмотрим метрологические аспекты процесса разработки датчиков физических величин, в частности, стандартизацию терминологии, для чего проанализируем нормативные и регламентирующие документы, используемые при разработке моделей датчиков физических величин (ДФВ).

Датчики являются особенными объектами метрологии, стандартизации и сертификации, так как от полноты и точности измерительной информации, получаемых с их помощью, будет напрямую зависеть безопасность и качество эксплуатации различных технологических, производственных и научных объектов.

Поэтому изложим и поясним, применительно к ДФВ основные положения, изложенные в ГОСТ касающиеся самих датчиков, а также процессов моделирования и разработки конструктивно-технологических решений для ДФВ [1-4].

Для электронных датчиков вышли два стандарта:

1. ГОСТ Р 51086-97. Датчики и преобразователи физических величин электронные. Термины и определения. Госстандарт России. ИПК. Издательство стандартов, 1997.

2. ГОСТ Р 8.673-2009 ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. Госстандарт России. ИПК. Издательство стандартов, 2009 г.

Кроме того, для всех ДФВ, действуют еще советские ГОСТ по нормированию их технических характеристик:

– ГОСТ 16263-70. Метрология. Термины и определения. М.: Госкомитет стандартов Совета министров СССР, 1976.

– ГОСТ 15.309-98 Система разработки и постановки продукции на производство. Испытания и приемка выпускаемой продукции.

Рассмотрим основные положения обобщающих стандартов:

По ГОСТ Р 51086-97 «Датчики и преобразователи физических величин электронные. Термины и определения», ныне действующим, приняты следующие термины и определения:

– *Датчик*: Средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

– *Преобразователь физической величины [ПФВ]*: Устройство, предназначенное для восприятия и преобразования контролируемой физической величины в выходной сигнал.

*Примечание*: Преобразователь физической величины имеет точностные характеристики и не относится к средствам измерения.

– *Электронный датчик (ЭД) [ПФВ]*: Датчик [ПФВ], выполненный на основе компонентов – изделий электронной техники.

– *Вид ЭД*: Электронный датчик, предназначенный для измерения [контроля] и преобразования конкретной физической величины.

– *Совмещенный ЭД*: ЭД, предназначенный для измерения [контроля] и преобразования двух и более физических величин.

– *Компонент ЭД*: Функциональная часть ЭД, предназначенная для реализации предписанной функции.

*Примечание*: Компонент ЭД может быть выполнен как самостоятельное изделие, не являющееся средством измерения.

– *Чувствительный элемент ЭД (ЧЭ)*: Функциональная часть ЭД, находящаяся под непосредственным воздействием физической величины.

– *Преобразовательный элемент ЭД*: Функциональная часть ЭД, в которой происходит одно из ряда последовательных преобразований контролируемой физической величины.

– *Измерительная электрическая цепь ЭД*: Электрическая цепь ЭД, осуществляющая измерительное преобразование и формирование выходного сигнала, а также коррекцию отдельных составляющих систематической погрешности ЭД.

– *Информативный параметр входного сигнала ЭД*: Параметр входного сигнала ЭД, функционально связанный с измеряемой [контролируемой] физической величиной.

– *Информативный параметр выходного сигнала ЭД*: Параметр выходного сигнала ЭД, функционально связанный с информативным параметром входного сигнала ЭД.

– *Значение выходного сигнала ЭД*: Оценка информативного параметра выходного сигнала ЭД, соответствующая значению измеряемой [контролируемой] физической величины.

– *Время преобразования ЭД*: Интервал времени от момента начала изменения входного сигнала ЭД до момента появления соответствующего выходного сигнала.

– *Коэффициент преобразования ЭД*: Величина, характеризующая отношение параметров входного и выходного сигналов ЭД.

– *Чувствительность ЭД*: Характеристика ЭД, определяемая отношением изменения выходного сигнала ЭД к вызывающему его изменению измеряемой [контролируемой] физической величины.

– *Абсолютная аддитивная чувствительность ЭД к влияющей физической величине*: Чувствительность ЭД, определяемая отношением максимального изменения входного сигнала ЭД при нулевом значении измеряемой [контролируемой] физической величины к изменению влияющей физической величины в пределах рабочей области значений.

– *Относительная аддитивная чувствительность ЭД к влияющей физической величине:* Чувствительность ЭД, определяемая отношением абсолютной аддитивной чувствительности датчика к значению влияющей физической величины.

– *Абсолютная мультипликативная чувствительность ЭД к влияющей физической величине:* Чувствительность ЭД, определяемая отношением приращения коэффициента преобразования ЭД к вызвавшему его приращению значению влияющей физической величины.

– *Относительная мультипликативная чувствительность ЭД к влияющей физической величине:* Чувствительность ЭД, определяемая отношением абсолютной мультипликативной чувствительности ЭД к значению влияющей физической величины.

– *Погрешности ЭД (основная, статическая, систематическая, случайная, дополнительная, динамическая):* Характеристики ЭД, количественно выражающиеся отклонениями номинального значения измеряемой физической величины данными от ее истинного значения полученными при разных условиях измерения и влияния внешних факторов.

– *Погрешность аппроксимации ЭД:* Погрешность, определяемая различием градуировочной характеристики ЭД и его номинальной функции преобразования.

– *Погрешность линейности ЭД:* Погрешность аппроксимации при линейной функции преобразования ЭД.

– *Погрешность воспроизводимости ЭД:* Погрешность ЭД, обусловленная рассеиванием реализации градуировочной характеристики.

– *Погрешность средств градуировки ЭД:* Результирующее значение погрешности всех средств, используемых при воспроизведении измеряемого параметра и измерении выходного сигнала ЭД в процессе его градуировки.

– *Частотный диапазон ЭД:* Диапазон частот, в котором обеспечивается заданная неравномерность амплитудно-частотной характеристики ЭД.

– *Амплитудно-частотная характеристика ЭД:* Динамическая характеристика ЭД, представляющая собой зависимость амплитуды установившихся колебаний выходного сигнала от частоты входного сигнала.

– *Переходная характеристика ЭД:* Динамическая характеристика ЭД, отражающая изменение во времени выходного сигнала при ступенчатом изменении входного сигнала.

– *Импульсная переходная характеристика ЭД:* Переходная характеристика ЭД при входном сигнале в виде единичного импульса.

– *Функция преобразования ЭД:* Зависимость информативного параметра выходного сигнала ЭД от информативного параметра его входного сигнала.

– *Реальная функция преобразования ЭД:* Функция преобразования, отражающая зависимость выходного сигнала ЭД от входного сигнала и влияющих физических величин.

– *Математическая модель систематической погрешности ЭД:* Аналитическое выражение, определяющее зависимость разности реальной и номинальной функции преобразования ЭД от значений измеряемой [контролируемой] физической величины и влияющих физических величин в рабочей области их значений.

– *Математическая модель случайной погрешности ЭД:* Аналитическое выражение, определяющее абсолютное или относительное значение случайной составляющей погрешности ЭД или функции среднего квадратического отклонения реальной функции преобразования.

– *Динамическая модель ЭД по измеряемой [контролируемой] физической величине:* Математическая модель, описывающая ЭД как динамическую систему в виде дифференциального уравнения, передаточной функции или характеристики, связывающей значения входного и выходного сигналов как функции времени.

– *Динамическая модель ЭД по влияющей физической величине:* Математическая модель, описывающая электронный датчик как динамическую систему в виде дифференциального уравнения, передаточной функции или характеристики, связывающей значения влияющей физической величины и выходного сигнала как функции времени.

*Примечание:* Характеристики, приведенные выше, являются метрологическими характеристиками для ЭД и точностными – для электронных ПФВ.

Согласно приведенным формулировкам и используемой терминологии, можно сделать вывод, что ДФВ являются сложными физическими структурами, которые чаще всего, представляют в себя, распределенные сенсорные структуры, математически описываемые дифференциальными уравнениями с частными производными.

Современные датчики физических величин (ДФВ), в качестве которых наиболее перспективными являются пьезорезисторные датчики давления (ПРДД), представляют собой сложные структуры, состоящие из большого числа взаимосвязанных систем и подсистем и элементов. Поэтому моделирование ПРД должна проводиться комплексно, охватывая все его уровни, начиная с низового: элемента и структуры и заканчивая. Моделирование ДФВ, его структур, элементов и технологий их изготовления позволяет выявить механизмы управления электрофизическими характеристиками (ЭФХ) с целью их оптимизации.

Следует отметить, что процесс синтеза моделей ДФВ отличается значительной сложностью, так как процесс преобразования воспринимаемой датчиком физической величины в промежуточные и выходную, характеризуется информационно-энергетическим обменом, как на атомарном уровне, так и на уровне элемента и структуры датчика. При этом механизмы передачи и обмена информации и энергии описывается на каждом уровне своим математическим аппаратом, например, уравнениями Максвелла, тензорного анализа, теории надежности, теории авторегулирования, квалитрии, теории информации и проч. [5-7]. В итоге из-за разнородного масштаба анализируемых элементов и структур датчиков, а также из-за различия в теории, практически невозможно разработать общую модель ДФВ, учитывающую все подсистемы, поэтому целесообразно разрабатывать «уровневые» электрофизические модели, представляющих собой декомпозицию ДФВ (рисунок 1) [8].

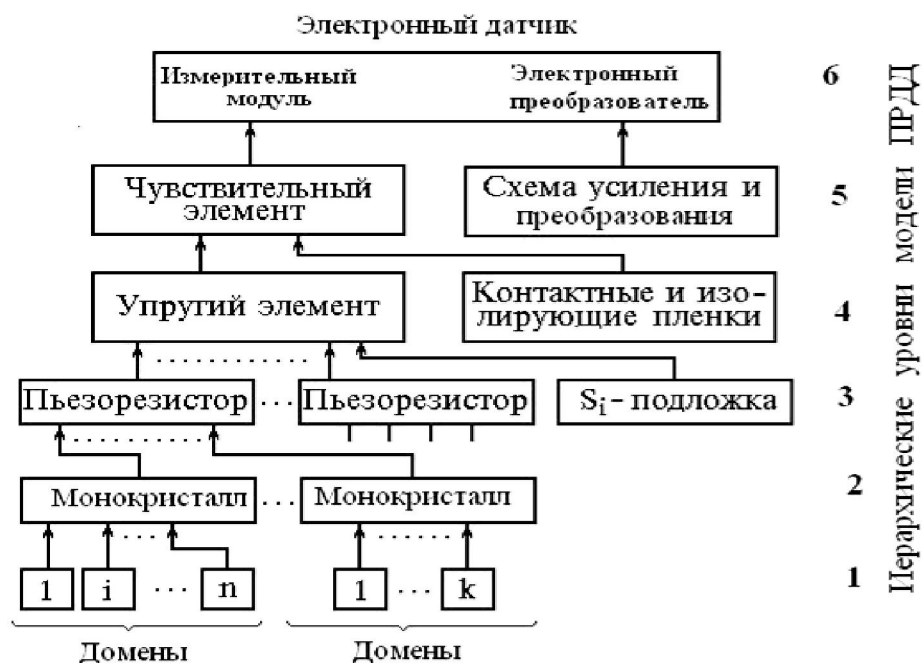


Рисунок 1 – Структурная модель пьезорезисторного датчика давления

В этой структурной модели представлено несколько уровней:

- 1 – элемент полупроводниковой структуры (домен);
- 2 – микроэлектронная структура (монокристалл);
- 3 – первичный измерительный элемент (пьезорезистор);
- 4 – конструктивный элемент (упругий элемент);
- 5 – сборочный узел (чувствительный элемент);
- 6 – электронный датчик (измерительный модуль + электронный преобразователь).

Приведенная декомпозиция является упрощенной моделью, так как в ней ПРДД представлен как система с сосредоточенными параметрами. В реальности ПРД является системой с распределенными параметрами, но синтез и анализ распределенной структуры в значительной мере усложняет процесс моделирования.

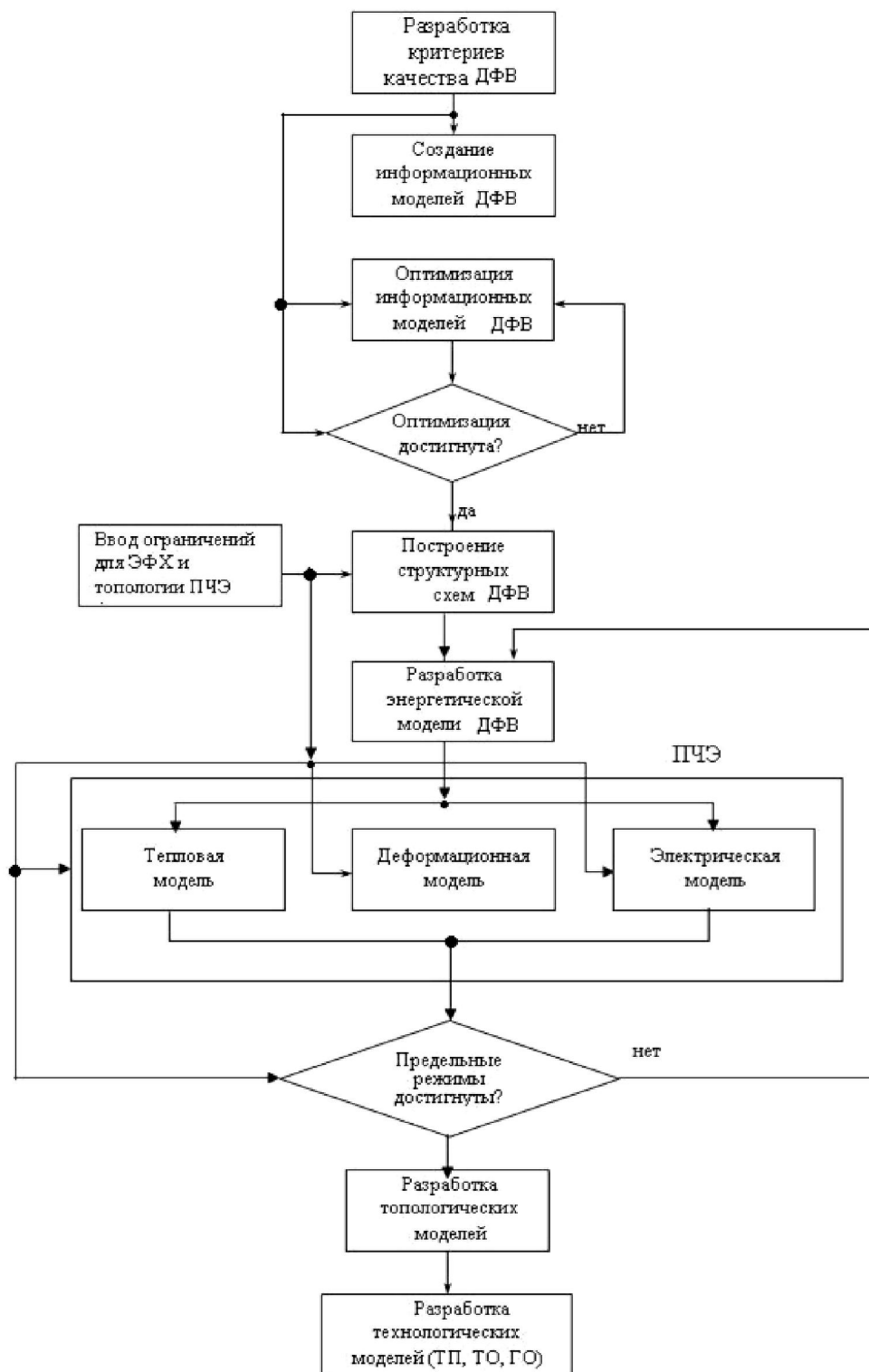


Рисунок 2 – Структура алгоритма синтеза комплекса ММ ДФВ

Синтез и анализ компонентов ДФВ охватывает 5 и 6 уровень – уровень чувствительного элемента (ЧЭ), измерительного модуля (ИМ) и датчика в целом, поэтому мы не рассматриваем низовые уровни, считая, что характеристики и параметры низовых уровней заданы.

Создание математических моделей (ММ) ЧЭ, ИМ и ДФВ, является очень важным этапом при проектировании, так как позволяет оптимизировать метрологические и конструктивные характеристики, а также спрогнозировать эксплуатационные свойства датчика.

В процессе разработки ММ часто используется принцип последовательного уточнения, т.е. сначала разрабатываются «грубые» ММ, с малой степенью приближенности к реальному объекту, а затем, по мере накопления информации, создаются более точные, но более сложные ММ. Как показывает практика, при разработке ММ ДФВ, целесообразно и менее трудоемко использование инженерных методик, основанных на практических результатах и экспертных методах [9]. Алгоритм синтеза комплекса математических моделей ДФВ, согласно ранее принятой иерархической модели (рисунок 1), представлен на рисунке 2.

При синтезе ММ ИМ и ДФВ входными параметрами являются:

- основные геометрические и присоединительные размеры элементов конструкции ДФВ (упругих элементов, корпусных деталей и т.п.);
- характеристики материалов основных конструктивных элементов (плотность, теплопроводность, прочность и проч.);
- характеристики электрических и магнитных материалов (электропроводность, индуктивность, емкость, ТКС и т.п.);
- характеристики источников энергии (напряжение, частота, мощность).

Переменными величинами в ММ являются:

- измеряемая величина –  $X(t)$ ;
- внешние воздействующие факторы –  $\Phi(j)$ ;
- выходная величина  $Y(X, \Phi, t)$ ;
- пространственные и временные координаты.

С помощью разработанных ММ для ДФВ могут быть получены:

- функции преобразования;
- погрешность от нелинейности;
- динамические характеристики (переходная, импульсная, АЧХ, ФЧХ);
- динамическая погрешность;
- распределенные прочностные характеристики;
- функции влияния и коэффициенты чувствительности.

Приведем конкретные примеры разработанных физико-математических моделей элементов и узлов микроэлектронных датчиков (рисунки 3–6).

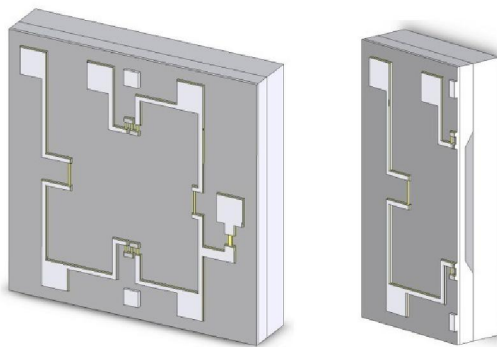


Рисунок 3 – Электронная твердотельная 3D-модель полупроводникового измерительного модуля датчика абсолютного давления

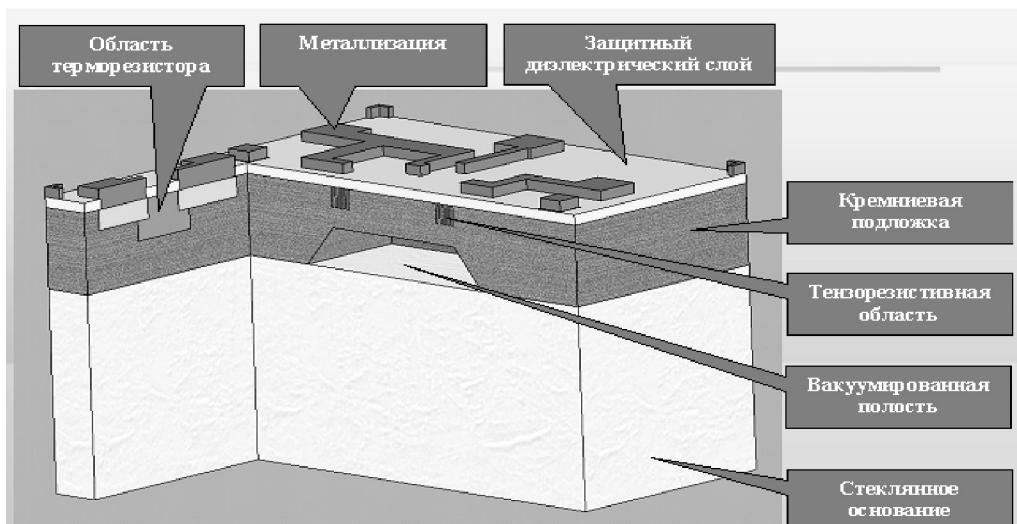


Рисунок 4 – Электронная твердотельная 3D-модель структуры полупроводникового измерительного модуля совмещенного датчика абсолютного давления и температуры

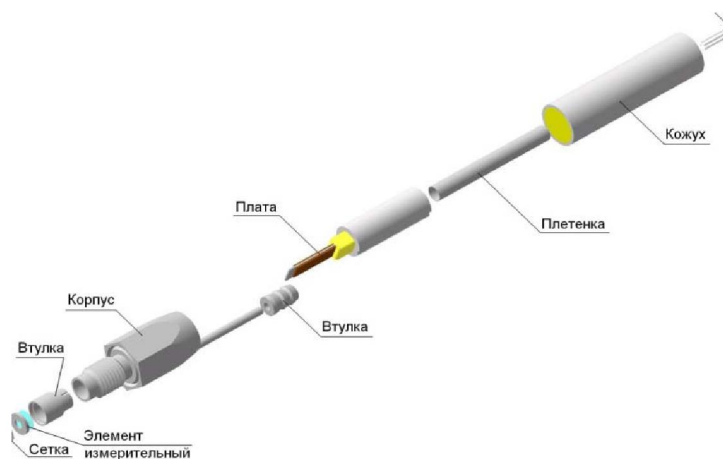


Рисунок 5 – Электронная 3D-модель миниатюрного датчика акустического давления

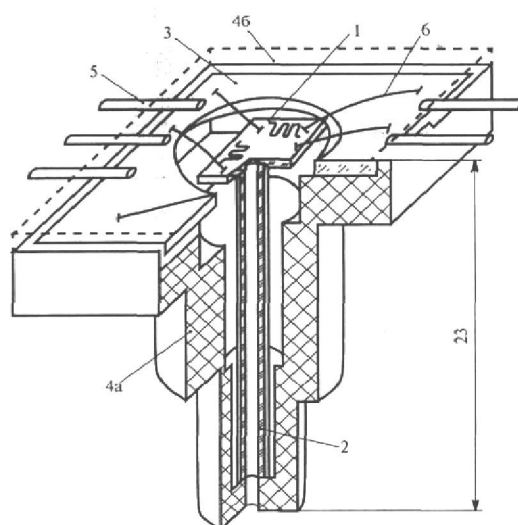


Рисунок 6 – Электронная 3D – модель совмещенного датчика давления и температуры: 1 – ПЧЭ, 2 – стеклокапилляр, 3 – компенсационная плата, 4а – корпус, 4б – крышка, 5 – электрические выводы, 6 – проволочные выводы

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ Р 51086-97 Датчики и преобразователи физических величин электронные. Термины и определения. – Госстандарт России ИПК Издательство стандартов, 1997.
- [2] ГОСТ Р 8.673-2009 ГСИ Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. – Госстандарт России ИПК Издательство стандартов, 2009.
- [3] ГОСТ 16263-70. Метрология. Термины и определения. – М.: Госкомитет стандартов Совета министров СССР, 1976.
- [4] ГОСТ 15.309-98 Система разработки и постановки продукции на производство. Испытания и приемка выпускаемой продукции.
- [5] Пикус Г.Е. Основы теории полупроводниковых приборов. – М.: Наука, 1965.
- [6] Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. – Л.: Энергия, 1968.
- [7] Най Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц / Пер. с англ. – М.: Мир, 1967.
- [8] Михайлов П.Г. Стабильность микроэлектронных датчиков и технологий (монография). – Пенза: ПГУ, 2003.
- [9] Райхман Э.П., Азгальдов Г.Г. Экспертные методы в оценке качества товаров. – М.: Экономика, 1974.

## REFERENCES

- 1 GOST R 51086-97 sensors and transducers of physical quantities e. Terms and definitions. Russian State Standard IEC Standards Publishing House, 1997.
- 2 GOST R 8.673-2009 ICG sensors intelligent and smart metering systems. Basic terms and definitions. Russian State Standard IEC Standards Publishing House, 2009
- 3 GOST 16263-70. Metrology. Terms and definitions. M.: State Committee Standards Council of Ministers of the USSR, 1976.
- 4 GOST 15.309-98 System development and launch of new products. Tests and acceptance of our products.
- 5 Pikus G.E. Fundamentals of the theory of semiconductor devices. M.: Science, 1965.
- 6 Novitsky P.V. Foundations of the theory of measurement devices. L.: Energy, 1968.
- 7 Nye J. Physical properties of crystals and their Representation by Tensors and Matrices. Per. Translated from English. M.: World, 1967.
- 8 Mikhailov P.G. Stability microelectronic sensors and Technology (monograph). Penza: PSU, 2003.
- 9 Reichman E.P., Azgaldov G.G. Expert methods to assess the quality of the goods. M.: Economics, 1974.

## МИКРОЭЛЕКТРОНДЫҚ ДАТЧИКТЕРДІҢ КОМПОНЕНТТЕРІ МЕН ҚҰРЫЛЫМДАРЫН МОДЕЛЬДЕУДІҢ ЖАЛПЫ МӘСЕЛЕЛЕРІ

К. А. Ожикенов<sup>1</sup>, П. Г. Михайлов<sup>2</sup>, А. О. Касимов<sup>1</sup>, В. А. Петрин<sup>3</sup>, Л. А. Маринина<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті, Алматы, Қазақстан;

<sup>2</sup>Пенза мемлекеттік технологиялық университеті, Пенза, Ресей;

<sup>3</sup>Пенза мемлекеттік университеті, Пенза, Ресей

**Тірек сөздер:** физикалық шамалардың датчигі, математикалық модель, динамикалық модель, сезгіштік, кәтелік.

**Аннотация.** Физикалық шамалардың микроэлектрондық датчиктерін жасаудың сатылары қарастырылады, модельдеудің терминологиялық аспектілері қарастырылады. Модельдеу кезінде датчиктердің иерархиялық құрылымдарына сүйеніп, модельді синтездеудің деңгейлік қағидалары қолданылады. Модельді синтездеудің алгоритмдері келтіріледі.

Поступила 23.10.2014 г.