

Преобладающее большинство датчиков – контактные, т. е. располагаются на объекте в местах непосредственной регистрации исследуемых параметров. Важнейшей особенностью является то, что, как правило, в этом месте на датчик одновременно воздействуют многие физические факторы. Он должен быть защищен от разрушительного влияния указанных факторов (механически надежен), а также обладать селективностью по отношению к регистрируемому параметру и независимостью (в пределах допустимой погрешности) по отношению ко всем остальным факторам (метрологически надежен). Таким образом, датчик представляет многополюсник с несколькими входами и одним выходом. Разделение воздействий путем изучения функций влияния по каждому из дестабилизирующих факторов практически нереально, поскольку требуется информация о всех влияющих факторах в местах установки основного датчика. Это целесообразно только в частных случаях. Если исследуемый параметр, например давление, а превалирующий влияющий фактор – температура, то целесообразна двухпараметровая реализация датчика, и поправки на температуру могут быть выполнены вполне корректно.

Однако главная задача проектирования датчика состоит в выборе принципов преобразования, при которых обеспечивается его надежная селективность к одному исследуемому параметру. Промежуточная задача – автоматическая компенсаторная коррекция дестабилизирующих воздействий на датчик, как правило, реализуемая в виде частных и ограниченных по своим возможностям решений. К таким же задачам относят конструкционную реализацию различных защитных мер от прямых воздействий влияющих факторов на датчик. Ее решают с помощью разделительных трубопроводов и полостей, волноводов, световодов, механических фильтров, теплозащитных прокладок, технологических приспособлений и др.

Заметим, что все защитные меры одновременно служат источниками систематических погрешностей датчиков при регистрации основного параметра, в том числе и защита чувствительного элемента от прямого контакта с окружающей средой.

Датчик также может оказывать дестабилизирующее влияние на исследуемый объект. Регистрация параметра объекта будет корректной в случае, когда установка на него датчика не меняет физическую картину изучаемого процесса и поведение контролируемого параметра. Это условие необходимое, но не достаточное. Процессы регистрации

корректны, если датчик способен воспринять и правильно воспроизвести действительное поведение данного параметра во времени.

В результате к процессу проектирования датчиков предъявляются требования не только взаимопротиворечивые, но даже и взаимоисключающие. Эту проблему можно устранить определением целевых функций и решением оптимизационных задач, которые чаще всего строго аналитически не решаются, и разработчику требуются практический опыт и интуиция.

Описание в общем виде процессов взаимодействия датчика с исследуемым объектом и преобразования в нем регистрируемой величины позволяет формализовать обобщенную структурную схему любого гипотетического датчика в виде, представленном на рис. 1. Смысл такой

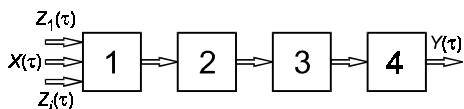


Рис. 1. Структурная схема датчика

формализации – единство методологии рассмотрения разнотипных датчиков. Здесь звено 1 – отвечает за восприятие входного воздействия и одновременную защиту датчика; звено 2 – осуществляет передачу входного воздействия чувствительному

элементу и одновременную защиту чувствительности элемента; звено 3 – чувствительный элемент, преобразующий исследуемую величину (уже преобразованную предыдущим звеном) в электрическую, электромагнитную и др.; звено 4 – согласующее устройство (входит в состав датчика по необходимости);  $X(\tau)$  – исследуемая величина (входное воздействие);  $Y(\tau)$  – выходная величина датчика;  $Z_1(\tau)$ ,  $Z_j(\tau)$  – влияющие (дестабилизирующие) факторы;  $\tau$  – время.

В конкретных реализациях датчиков те или иные звенья могут отсутствовать или их функции могут быть выражены неявно, или может быть несколько звеньев одного и того же назначения, например звено 2 (см. рис. 1). Последовательность преобразований в каждом конкретном датчике своя, но укладывается в предлагаемую структурную схему.

При этом каждое звено осуществляет функции преобразования и вносит свой вклад в точность и динамические свойства датчика. Более того, этот вклад будет решающим в формировании погрешности результата регистрации всей системы, в состав которой входит датчик.

Устранение несовершенств метрологических характеристик датчика возможно лишь с известными ограничениями: увеличение точности

при снижении динамических характеристик и, наоборот, повышение динамических параметров за счет прочности и надежности и т. д.

Каждый датчик описывается оператором, устанавливающим однозначную связь между его входной  $X(\tau)$  и выходной  $Y(\tau)$  величинами. Этот оператор определяет как статические, так и динамические характеристики датчика. Если оператор линеен (для него справедлив принцип суперпозиции), то такие датчики могут называться линейными.

В зависимости от структуры физической модели датчика и модели его взаимодействия со средой существуют датчики с сосредоточенными (вход представлен в виде точки) и распределенными (вход распределен по некоторой поверхности) параметрами. Первый датчик описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями, а второй – уравнениями в частных производных или с помощью более сложных представлений.

Порядок уравнения определяет порядок датчика. Так, датчик с сосредоточенными параметрами первого порядка описывается уравнением

$$\partial Y(\tau)/\partial \tau + aY(\tau) = bX(\tau), \quad (1)$$

где  $a, b$  – постоянные коэффициенты.

Таким образом можно описать многочисленные датчики различных типов, например, уравнение *датчика температуры с однородной структурой* имеет вид

$$dt_d(\tau)/d\tau + at_d(\tau) = at_n(\tau), \quad (2)$$

где  $t_d$  – температура датчика, однозначно определяющая его выходной параметр;  $t_n$  – регистрируемое значение исследуемой температуры;  $a = \alpha S/mc$ ;  $\alpha$  – коэффициент конвективного теплообмена датчика со средой;  $S$  – площадь его регистрируемой поверхности;  $m$  – масса части датчика, воспринимающая информацию;  $c$  – удельная теплоемкость материала датчика.

подавляющее большинство датчиков описывается уравнением для датчика с сосредоточенными параметрами второго порядка аperiodического и колебательного типов

$$\frac{d^2 Y(\tau)}{d\tau^2} + c \frac{dY(\tau)}{d\tau} + aY(\tau) = bX(\tau). \quad (3)$$

Ниже рассмотрим некоторые типы датчиков.

*Датчик температуры в защитной оболочке* (неоднородная структура). Оболочка считается тонкой, однородной, в ней отсутствуют градиенты температуры. В этом случае уравнение имеет вид

$$\frac{d^2 t_d(\tau)}{d\tau^2} + c \frac{dt_d(\tau)}{d\tau} + at_d(\tau) = bt_n(\tau); \quad (4)$$

$$c = \lambda \left[ \frac{S_{\text{ЧЭ}}}{c_{\text{ЧЭ}}} + \frac{S_{\text{об}}}{c_{\text{об}}} \right] + \alpha_{\text{об}} \frac{S_{\text{об}}}{c_{\text{об}}},$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности промежутка между чувствительным элементом (ЧЭ) и оболочкой;  $S_{\text{ЧЭ}}$ ,  $S_{\text{об}}$ ,  $c_{\text{ЧЭ}}$ ,  $c_{\text{об}}$  – площади поверхности и полные теплоемкости ЧЭ и оболочки;  $\alpha_{\text{об}}$  – коэффициент конвективного теплообмена оболочки со средой;

$$a = \lambda \frac{S_{\text{ЧЭ}}}{c_{\text{ЧЭ}}} \alpha \frac{S_{\text{об}}}{c_{\text{об}}}; \quad b = \alpha_{\text{об}} \frac{S_{\text{об}}}{c_{\text{об}}} \lambda \frac{S_{\text{ЧЭ}}}{c_{\text{ЧЭ}}}.$$

*Датчик вибрационных ускорений*

$$m \frac{d^2 X(\tau)}{d\tau^2} + k \frac{dX(\tau)}{d\tau} + \sigma X(\tau) = ma(\tau), \quad (5)$$

где  $m$ ,  $k$  – инерционная масса и коэффициент демпфирования датчика;  $\sigma$  – жесткость упругого элемента;  $X$  – виброосмещение;  $a$  – регистрируемое ускорение.

*Датчик давления мембранного типа*

$$m \frac{d^2 X_m(\tau)}{d\tau^2} + k_m \frac{dX_m(\tau)}{d\tau} + \sigma_m X_m(\tau) = p_n(\tau),$$

где  $m$ ,  $X_m$ ,  $k_m$ ,  $\sigma_m$  – масса, прогиб, коэффициент демпфирования, жесткость мембраны;  $p_n$  – регистрируемое давление.

Существенно более полное описание датчика можно получить, если рассматривать модель с распределенными параметрами.

*Датчик температуры любой сложной структуры*

$$\frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial t} = a_T \nabla^2 t(x, y, z, \tau) \quad (6)$$

с граничным условием (на поверхности датчика при равенстве отводимого и подводимого тепловых потоков  $s$ )

$$\lambda \left. \frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial n} \right|_s + \alpha [t(x, y, z, \tau)]|_s = -t_n(\tau) = 0. \quad (7)$$

Здесь  $a_T$  – коэффициент температуропроводности датчика;  $n$  – нормаль к его поверхности;  $t|_s$  – температура на поверхности.

*Датчик давления мембранного типа*

$$E \left[ \frac{\partial^2 X_m(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial X_m(r, \tau)}{\partial r} \right] + p_n(\tau) = k_m \frac{\partial X_m(r, \tau)}{\partial r} + m_s \frac{\partial^2 X_m(r, \tau)}{\partial r^2} \quad (8)$$

с граничным условием  $X_m(r, \tau)|_{r=R} = 0$ .

Здесь  $E$  – упругий коэффициент материала мембраны;  $r$ ,  $R$  – текущий и начальный радиусы;  $m_s$  – погонная масса поверхности мембраны.

Решение уравнений (1) – (8) с разной степенью приближения для различных структур датчиков позволяет для априори известных условий применения создавать датчики с прогнозируемыми метрологическими характеристиками.

Для общей методологии проектирования датчиков представляется принципиальной необходимостью их обоснованной классификации по существенным независимым классификационным признакам. Эта классификация не может и не должна претендовать на полное подробное описание датчика, но должна определять его принципиальную принадлежность к конкретному типу. Таких классификационных признаков может быть всего четыре:

- параметр, исследуемый датчиком;
- агрегатное состояние объекта исследования;
- принцип преобразования в ЧЭ датчика;
- число компонентов параметра (если параметр – векторная величина) или число исследуемых параметров.

Остальные классификационные признаки, часто встречающиеся в литературе, либо имеют вторичную природу, либо несущественны,

вследствие чего любая такая классификация носит эклектический характер [4 – 8 и др.].

Предлагаемая общая классификация представлена на рис. 2. Она не только не исключает, но предполагает возможность и необходимость в ряде случаев разветвленной классификации внутри каждого типа датчиков.

В попытках дать определение датчика, все время присутствует желание чрезмерно расширить трактовку этого понятия. Очевидно, что «граница слева» должна определяться включением в состав датчика всех тех звеньев преобразования исследуемой величины, без которых его функция преобразования утрачивает свою определенность (воспроизво-

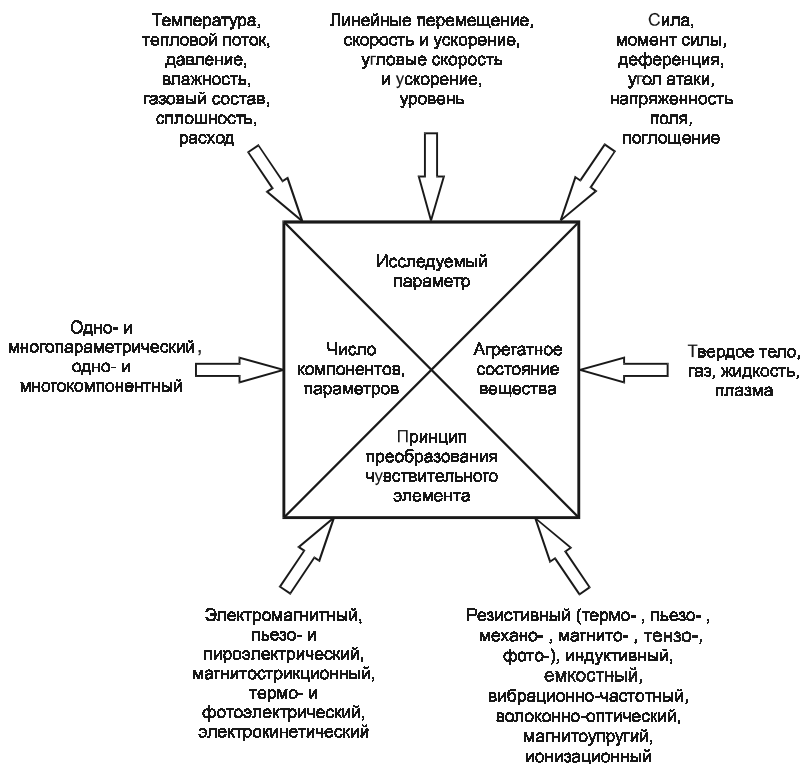


Рис. 2. Классификация датчиков

димось, временную стабильность, динамические свойства и т. д.). Для этого, по-видимому, целесообразно использовать промежуточные понятия, например, пленочный тензометр или пленочный емкостный элемент, которые становятся датчиками при наклеивании на исследуемую поверхность, и их функции преобразования включают в себя свойства клеевого слоя и самой поверхности. В состав вибродатчика должен входить механический фильтр, а в состав датчика динамического давления – разделительная полость или трубопровод.

«Граница справа», по мнению авторов, должна определяться тем звеном преобразования, присутствие которого в конкретном датчике необходимо, например, согласование ЧЭ датчика с измерительной линией по реактивной составляющей, термокомпенсационные элементы и т. д.

В последние 15 – 20 лет обозначилась тенденция проектирования так называемых «интеллектуальных датчиков», сдвигающих «правую границу» настолько, что каждый такой датчик превращается в автономную СИКУД. К числу «интеллектуальных» функций относят цифровое преобразование аналоговой информации, компенсацию недостатков датчика (нелинейность функции преобразования, влияющие факторы), самодиагностику. Безусловно, все эти функции должны быть присущи информационному каналу, но весьма спорной является необходимость и целесообразность наделять ими каждый датчик. Ведь датчики располагаются в местах наиболее концентрированного воздействия всех влияющих факторов, присущих данному объекту, и на работу электронных элементов в таких эксплуатационно-напряженных местах будут сильно влиять помехи. Кроме того, построение современных СИКУД позволяет эти функции делать общими для групп датчиков. Поэтому в большинстве специально немотивированных случаев усложнение структуры датчика и повышение его стоимости из-за наращивания функций, без которых он может обойтись, едва ли оправданно. С точки зрения метрологической и механической надежности датчика, необходима минимизация его структуры.

Таким образом, в изложенной трактовке датчик – это самостоятельное, конструктивно автономное средство, размещаемое в месте отбора информации, состоящее из минимально необходимого числа звеньев преобразования исследуемой величины, обладающее однозначной функцией преобразования и требуемыми для данных целей исследования взаимно согласованными (непротиворечивыми) метрологическими

характеристиками и надежностью. Такой подход позволяет одновременно обеспечить высокую технологичность базовых конструкций и построить на их основе унифицированные ряды датчиков.

На каждом инженерно-техническом объекте (ИТО) важнейшим является надежность как отдельных приборов, агрегатов, систем, так и изделия в целом. Все датчики, применяемые в ИТО, относятся, в основном, к невосстановимым приборам, поэтому их надежность характеризуют вероятностью выхода из строя за время эксплуатации в составе изделия. Требования к надежности датчиков всегда рассматриваются в двух аспектах: метрологическом и механическом. При этом надежность датчиков должна достигать 0,999 – 0,9999, а в некоторых случаях и выше. Проблему создания датчиков необходимо рассматривать комплексно. Ее решение включает следующие направления [6 – 11].

1. Информационное обеспечение разработок, которое должно давать достаточно полное представление обо всем предшествующем опыте создания конструкции датчика, его оперативном использовании применительно к конкретным ситуациям, установлении объективно сложившихся закономерностей (научно-методологических, практических, технологических и метрологических) развития конструирования датчиков с целью выработки оптимальных научно-обоснованных путей создания датчиков новых классов в рамках унифицированных рядов.

2. Специальные вопросы теории и опытов с целью создания как основ проектирования датчиков, так и основ САПР конкретных типов и отдельных конструктивных узлов. Реализация этой задачи связана с поиском, изучением и анализом новых физических явлений и эффектов, оценкой области их возможного использования для создания ЧЭ, изучением вариантов конструкций в статическом и динамическом режимах. Необходим учет влияния воздействия различных дестабилизирующих факторов на новые конструкции датчиков и опытная проверка этого влияния, опытная проверка научно-технических, технологических и конструкторских решений с учетом метрологических и конструктивных требований. При этом определяющее значение имеет глубокий и всесторонний анализ статических и динамических погрешностей датчиков, а также динамических характеристик с учетом исследования динамики изменений влияющих факторов и оценки реакции ЧЭ на эти воздействия; обеспечение вопросов унификации с учетом эффектов потерь на этапах проектирования, производства и эксплуатации.

3. Технологическое обеспечение разработок, которое должно охватывать знание существующих материалов с учетом стойкости в



широком диапазоне температур, комплектующих изделий, высокотемпературных компаундов, клеев и различных композиционных составов, вопросы технологии, создание новых технологических процессов с учетом потребностей будущего производства. Сюда же относятся изучение, создание и применение новейших технологических процессов и технологического оборудования, достижений микроэлектроники, разработка и изготовление макетных образцов датчиков, их опытное исследование с учетом всех дестабилизирующих факторов, возникающих при эксплуатации изделия в составе ИТО, внедрение в серийное производство и, наконец, авторский надзор.

4. Метрологическое обеспечение разработок должно охватывать развернутую систему исследований, определяющую как технологические процессы, контроль и управление ими, так и качество и свойства выпускаемой датчиковой аппаратуры. Метрологическое обеспечение имеет первостепенное значение для учета материально-технических ресурсов, планирования и обеспечения качества выпускаемых датчиков, взаимозаменяемости конструктивных элементов и узлов и совершенствования технологии, обеспечения безопасности труда и других видов деятельности.

Особенностью метрологического обеспечения датчиков является поддержание на высоком уровне единства и достоверности эталонных средств измерений в отраслях, где создаются датчики. Метрологические службы этих отраслей должны осуществлять разработку и проведение организационно-технических мероприятий, способствующих повышению эффективности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и производства, а также решать задачи по управлению качеством, стандартизацией и унификацией контрольно-измерительного и испытательного оборудования.

5. Разработка специальных методических и практических рекомендаций с целью создания теоретических и экспериментальных основ проектирования различных типов датчиков. Реализация задач этого класса связана с поиском, изучением, исследованием и анализом новых физических явлений и эффектов, созданием теорий расчета конструктивных решений как в статическом, так и в динамических режимах, строгим учетом влияния различных дестабилизирующих факторов на новые конструкционные модели, экспериментальной проверкой и подтверждением конструкционных разработок и отработанных технических решений с учетом метрологических и эксплуатационных требований. При этом необходимо знать статические и динамические погрешности, а также контролировать динамические характеристики по резуль-

татам исследования влияния дестабилизирующих факторов и оценки реакции датчиков на эти воздействия.

6. Техническое обеспечение разработки датчика включает в себя техническое задание, где четко формулируется задача проектирования конкретного типа датчика, приводятся теоретическое и техническое обоснования принципиальной возможности его реализации.

Каждое из перечисленных направлений представляет собой самостоятельную и достаточно сложную техническую задачу, решение которой должно в обязательном порядке выполняться в комплексе и взаимосвязи. Особое внимание следует обратить на совместимость проектируемых и реализуемых датчиков и их СИКУД для различных изделий ИТО.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Сретенский В. Н.** Метрологическое обеспечение производства приборов микроэлектроники. М.: Радио и связь, 1988.

2. **Алейников А. Ф.** Многофункциональные датчики. Новосибирск: ФТИ, 1991.

3. **Виглеб Г.** Датчики. М.: Мир, 1989.

4. **Како Н., Яманэ Я.** Датчики и микроЭВМ. Л.: Энергоатомиздат, 1989.

5. **Осипович Л.** Датчики физических величин. М.: Машиностроение, 1979.

6. **Коптев Ю. Н., Гориш А. В.** Датчиковая аппаратура для ракетно-космической техники //Радиотехника. 1995. № 10.

7. **Коптев Ю. Н., Гориш А. В.** Волоконно-оптические датчики космического базирования //Там же.

8. **Гориш А. В.** Принципы оптимизации пьезокерамических чувствительных элементов датчиков //Экология, мониторинг и рациональное природопользование: Труды МГУЛ. М., 1998. Вып. 294(II).

9. **Гориш А. В., Гришин В. М., Бульканов М. М.** Патентный информационно-библиографический банк данных «Материалы, технологии, изделия пьезоэлектроники» // Там же.

10. **Коптев Ю. Н. и др.** Датчики теплофизических и механических параметров. М: ИПРЖР, 1998 – 2000. Т. 1 – 3.

11. **Малков Я. В.** Философия проектирования датчиков для измерения физических величин // Экология, мониторинг и рациональное природопользование: Труды МГУЛ. М., 1997. Вып. 288(II).

*Дата принятия 18.02.2010 г.*

## ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

**Е. М. БЕЛОЗУБОВ, В. А. ВАСИЛЬЕВ, Н. В. ГРОМКОВ, П. С. ЧЕРНОВ**

*Пензенский государственный университет, Пенза, Россия, e-mail:opto@bk.ru*

*Рассмотрены датчики давления, выпускаемые в России и за рубежом. Выделены основные проблемы и задачи, которые возникают при их разработке. Приведены технические данные лучших серий, определено перспективное направление в создании микроэлектронных датчиков давления с частотным выходом.*

**Ключевые слова:** датчик давления, нано- и микроэлектромеханические системы.

*The types of pressure sensors produced in Russia and abroad are considered. The basic problems and tasks that developers of sensors are solveing are outlined. The technical details of the best series of pressure sensors are presented. The promising direction for creation of microelectronic pressure sensors with frequency output is determined.*

**Key words:** pressure sensor, nano- and microelectromechanical systems (MEMS).

В настоящее время существует множество зарубежных фирм, изготавливающих датчики давления (ДД) на основе современных технологий, например: Honeywel; ADZ NAGANO; Freescale Semiconductor; OMEGA; KULITE; Sensoror ASA; Setra Systems, Inc; Robert Bosch GmbH; Panametrics, Inc.; Denso Corporation; Matsushita Electric Works, Nagano Keike; Tokyo Electron; Hideo; Akira; Omron; Ford Motor Company; Fuji Electric и др.

В России и за рубежом выпускаются ДД с различными пределами и диапазонами измеряемых давлений, выполненные по полупроводниковой и тонкопленочной технологиям [1 – 14]. Информация о таких датчиках представлена на разных сайтах фирм и организаций, как правило, носит рекламный характер и часто отражает только те характеристики датчиков, которыми они выгодно отличаются от аналогов. Номенклатура выпускаемых датчиков весьма обширна.

Основными качественными и эксплуатационными показателями ДД являются: диапазон измерений, вид измеряемого давления, погрешность (точность), диапазон рабочих температур, выходной сигнал, назначение и особенности применения. Большинство этих приборов имеют диапазон измерений 0,1 – 100 МПа, основную погрешность в нормальных условиях применения не более 0,8%, диапазон рабочих температур от –50 до +125 °С, выходной сигнал милливольтный (0 – 10 мВ, 0 – 100 мВ), нормализованный (0,5 – 5 В), токовый (4 – 20 мА), частотный (1 – 10 кГц) и цифровой. Датчики используются для измерения относительного, абсолютного, избыточного давлений жидкостей и газов. Все ДД по диапазонам измерений условно можно разделить на три группы: малых (100 Па – 100 кПа), средних (100 кПа – 100 МПа) и высоких (более 100 МПа) давлений. В промышленной и медицинской электронике и бытовой технике чаще всего применяют датчики на основе полупроводниковых структур. На российском рынке широко представлены ДД зарубежных фирм: Honeywell, Motorola, Gefran, Siemens, Omron, ADZ NAGANO, TRAFAG AG, Freescale Semiconductor, Infineon, Sensera, IFM-electronic, Turck, Jumo и др.

При производстве микроэлектронных датчиков наиболее широкое распространение получили следующие технологии: пьезорезистивная, тонкопленочная на керамике, NiCr-тонкопленочная на стали, Poli-Silicon-тонкопленочная на металле. Наилучшей, с точки зрения долговременной стабильности, является NiCr-тонкопленочная технология на металле. Там, где требуются высокоточные и высокостабильные измерения, например, в ракетной и авиационной технике, используют ДД на основе тонкопленочных нано- и микроэлектромеханических систем (НнМЭМС), созданные с применением тонкопленочной технологии на металле [15 – 18].

Лидирующие позиции в области пьезорезистивных датчиков занимает фирма Honeywell как по объему, так и по ассортименту выпускаемой продукции. Она производит датчики малых, средних и высоких давлений с достаточно широкими температурными диапазонами (от –40 до +125 °С) как с усилением выходного сигнала, так и без него (ДД серий MLH, ХСХ, ХРХ, DG и т. п.). Датчики с усилением выходного сигнала предназначены для систем автоматизации, где этот сигнал является управляющим, без усиления – для приборов и систем, которые могут преобразовывать сигнал через АЦП и выполнять более сложные преобразования и вычисления с помощью микроконтроллера.

Основой различных моделей датчиков фирмы Honeywell является тензочувствительный элемент, представляющий, как правило, четыре идентичных пьезорезистора, соединенных по мостовой схеме и имплантированных в канавки, выгравленные на поверхности кремниевой мембраны толщиной от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров в зависимости от диапазона давления конкретного ДД. В датчиках для измерения давления сухих и влажных неагрессивных газов (обычно эти датчики имеют пластмассовый корпус) чувствительный элемент защищен от влаги, пыли и грязи слоем силиконового геля. Датчики, предназначенные для измерения давления жидких агрессивных сред (заключены в корпус из нержавеющей стали или латуни), содержат дополнительную защитную мембрану из латуни или нержавеющей стали, давление на сенсор передается через слой силиконового геля. В большинство ДД фирмы Honeywell встроены цепи температурной компенсации смещения и чувствительности. В некоторых моделях предусмотрены схемы подавления шумов источника питания, защиты от случайной смены его полярности и резких скачков напряжения.

Значительное место на рынке занимает фирма Motorola, которая выпускает датчики абсолютного, дифференциального (для измерения разности давлений), относительного (для измерения избыточного по сравнению с атмосферным) давления и датчики вакуума (для измерения степени разрежения). Пределы измерений датчиков абсолютного давления составляют 100 – 700 кПа, датчиков дифференциального давления – до 4 и 1000 кПа. Приборы фирмы Motorola разделены на группы: некомпенсированные (Uncompensated), термокомпенсированные и калиброванные (Compensated), интегрированные (Integrated) и медицинские (Medical) датчики. Некомпенсированные датчики состоят из упругого элемента – кремниевой диафрагмы (мембраны), непосредственно на которую методом ионной имплантации внедрена тензорезистивная структура. Благодаря сцеплению тензорезистора и кремниевой мембраны на атомно-молекулярном уровне удается исключить погрешности, связанные с передачей деформации от упругого элемента к тензорезистору. Вследствие крестообразного расположения четырех выводов чувствительный элемент, запатентованный фирмой Motorola, получил название X-ducer. Более сложные термокомпенсированные и калиброванные датчики включают также терморезисторы для коррекции температурной погрешности нуля и чувствительности датчика,

дополнительные подгоночные резисторы. В процессе производства осуществляется лазерная подгонка элементов для минимизации разброса нулевого смещения и чувствительности датчиков от образца к образцу. В схему интегрированных ДД (со стандартным выходным сигналом) введен дополнительный усилитель, который приводит выходное напряжение датчика к стандартному входному диапазону интегральных АЦП. Медицинские датчики по степени интеграции соответствуют термокомпенсированным и калиброванным датчикам, но они выделены в отдельную группу, их тип корпуса, рабочий и температурный диапазоны согласованы со специальными медицинскими приложениями. Фирма Motorola выпускает датчики в корпусе без порта или с портом. В базовом корпусе чувствительный элемент приклеен к внутренней поверхности корпуса и защищен специальным гелем, который равномерно передает давление на мембрану и в то же время изолирует выводы чувствительного элемента от внешней среды. Датчик с дифференциальным чувствительным элементом может быть дифференциальным, относительным или вакуумным в зависимости от типа используемого порта. Дифференциальный датчик (DP) имеет два ввода для подачи среды с обеих сторон мембраны, относительный датчик (GP, GS, GSX) – один ввод для подвода среды со стороны большего давления и отверстие в корпусе, через которое окружающий воздух свободно поступает с другой стороны мембраны, вакуумный датчик (VP) – ввод со стороны меньшего давления.

Датчики фирм Honeywell, Motorola и других производителей объединены в серии, как правило, по конструктивному признаку и степени интеграции и различаются диапазоном и типом измеряемого давления. Многие из перечисленных выше фирм также используют пьезорезистивную технологию.

В области разработки, производства тонкопленочных ДД с использованием NiCr-тонкопленочной технологии на металле лидируют фирмы США, Японии, Германии, Швейцарии, Великобритании, Франции: OMEGA (серия PX), Nagano Keiki, ADZ Nagano (датчики давления серий SML, SMK), Trafag AG (серии NAT, NAN, NAE, CMP, NSL, 88), Bell&Howell, Setra Sistem, METALLUX (серия SPS), Gefran (серия MJ), Wika, GFS, Datametrics, Siemens AG (серия ZD), Endress & Hauser, Rosemount, Boeing Co, Meclec Co, Fischer&Porter. Основные параметры и характеристики датчиков давления некоторых ведущих производителей (технические данные по лучшим сериям датчиков) представлены в таблице.

**Основные параметры и технические характеристики датчиков давления различных производителей  
(по лучшим сериям датчиков)**

Фирма-производитель	Диапазон измерений давления, МПа	Попрешность измерения, %	Диапазон рабочих температур, °С	Выходной сигнал	Тип измеряемого давления (назначение датчика)
Honeywell (MLH – тонкопленочные, полупроводниковые)	0,6 – 56	± 0,25	от -40 до +125	Милливольтный (0 – 50 мВ), пропорциональный (0,5 – 4,5 В), нормированный (0,25 – 10,25 В) и токовый (4 – 20 мА)	Избыточное, абсолютное давление жидкостей, газов (общепромышленное назначение)
ADZ NAGANO	от -0,1 до 200	± (0,1 – 1,5)	от -50 до +150	Токовый (4 – 20 мА), вольтный (0 – 10 В), цифровой CAN BUS (АЦП 12 разр., контроллер 8 разр./8 МГц)	Относительное, абсолютное, перепад давления, пульсации давления жидкостей, газов (общепромышленное назначение)
Freescape Semiconductor	$10^{-3}$ – 1	Не более 1	от -45 до +125	Милливольтный (0 – 50 мВ), нормализованный (0,5 – 4,5 В)	Избыточное, абсолютное, дифференциальное давление сухих и влажных газов (авто-, промышленная и медицинская электроника, бытовая техника)
НИИФИ Br206.1A, Br212A1 ДАВ 084 ДАВ 085	2,8 – 125 0,16 – 0,6 1 – 10	± 0,25 ± 0,25 ± 0,25	от -196 до +100 от -60 до +250 от -60 до +250	0 – 9 мВ 0 – 16 мВ 0 – 16 мВ	Избыточное давление Абсолютное давление То же
OMEGA PX 1005 PX 5000 PX 1009 [5]	0,1 – 70 0,1 – 0,7 0,1 – 70	± 0,25 ± 0,15 ± 0,25	от -196 до +149 от -54 до +150 от -54 до +350	0 – 18 мВ 0 – 30 мВ 0 – 30 мВ	Избыточное давление То же Абсолютное давление
KULITE	0,1 – 35	± 0,25	от -55 до +125	0 – 100 мВ	Избыточное давление

Среди ведущих российских разработчиков и производителей датчиков давления можно выделить ОАО «НИИФИ», ЗАО «Манометр», ОАО «Теплоприбор», ЗАО «НПК ВИП», ФГУП ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко», ОАО «НПП «Элемер», ООО «Сенсор», ОАО «НПП «Темп» им. Ф. Короткова», ОАО «Энгельсское ОКБ «Сигнал» им. А. И. Глухарева» и др.

Зарубежные и отечественные специалисты решают задачи по повышению точности измерений, чувствительности, линейности и стабильности, защите от агрессивных сред и перегрузочных давлений, снижению габаритных размеров, массы и стоимости, расширению функциональных возможностей, повышению технологичности производства. При этом значительное внимание уделяется вопросам уменьшения влияния температур и виброускорений на характеристики ДД.

Фирмы Setra Sistem, METALLUX, GFS, Siemens AG в целях минимизации влияния температур используют кварц или керамику для изготовления упругих элементов датчиков. Фирмы Nagano Keiki, ADZ NAGANO применяют мембрану из нержавеющей стали с тонкопленочными резисторами из поликристаллического кремния ( $\text{SiO}_2$ ) и микропроцессорную обработку сигнала (микросхема ASIC). Компенсируют влияния температуры, нелинейности, гистерезиса с помощью электронной калибровки и оригинального программного обеспечения. Датчики фирмы ADZ NAGANO предназначены для измерений абсолютного, избыточного давления, разрежения и перепада давлений в широком, настраиваемом по желанию заказчика диапазоне измерений от  $-0,1$  до  $200$  МПа с погрешностью  $\pm (0,1 - 1,5)$  при рабочих температурах от  $-50$  до  $+150$  °С.

Фирма Trafag AG для повышения температурной стабильности использует в качестве материала тензорезисторов структуры NiCr. Отличительная особенность датчиков специального назначения (NSL, NAT, NAN, CMP) – полностью сварная (без дополнительных уплотнений) сенсорная система на стальной NiCr-мембране, которая обеспечивает высокие виброустойчивость и точность измерений, долговременную стабильность.

В датчиках NSL, NAT, NAN имеется встроенный микрочип ASIC с возможностью многопараметрической калибровки. Микрочип представляет собой специальную программируемую прецизионную интегральную схему с хранением данных в запоминающем устройстве, пригодном для расширенного диапазона рабочих температур. Кроме того, фирма Trafag AG предусмотрела возможность применения переносного коммуникатора для настройки датчика. Диапазон измерений



датчиков NSL, NAT, NAN составляет 0,02 – 240 МПа, выходной сигнал 4 – 20 мА, 0 – 10 В, погрешность (нелинейность и гистерезис) до 0,1 % измеряемого диапазона, долговременная стабильность менее  $\pm 0,1$  % диапазона измерений в год, температурный диапазон от  $-40$  до  $+125$  °С, вибро- (ударо) прочность до 50/100 g. Фирма Trafag AG обладает собственной технологией микропроцессоров ASIC: специальной запатентованной «трехмерной» калибровкой по давлению, температуре, выходному сигналу, позволяющей повысить стабильность датчиков и обеспечить возможность компенсации помех.

Для повышения термоустойчивости датчиков до 300 – 400 °С фирмы Gefran и Wika размещают тензорезисторные схемы вне зоны высоких температур. Значение измеряемого давления в этом случае передается при помощи трубки, заполненной ртутью или специальной жидкостью. Фирма Meclec Со повышает термостойкость тонкопленочных емкостных датчиков давления благодаря применению недеформируемого диэлектрика из сапфира. Все производители значительное внимание уделяют технологии изготовления датчиков, предназначенных для работы в широком диапазоне температур. Чтобы повысить виброустойчивость, используется тщательная отработка конструктивно-технологических решений на основе сварных корпусов и высокопрочных материалов.

В России тонкопленочные датчики давления разрабатывают и серийно изготавливают ОАО «НИИФИ» (тонкопленочные ДД серий Вт, ДДВ, ДСЕ), НПП «Элемер» (тонкопленочные ДД серии АИР с использованием элементов фирмы Rosemount), ООО «Сенсор» (тонкопленочные тензорезисторные ДД серии РПГ), ОАО «НПП «Темп» им. Ф. Короткова», ОАО «Энгельсское ОКБ «Сигнал» им. А. И. Глухарева» (тонкопленочные емкостные ДД серий ДАЕ, ДАТ, ДИД).

Один из лидеров по точностным и эксплуатационным показателям датчиков – ОАО «НИИФИ» [19]. Оно выпускает множество разновидностей датчиковой и преобразующей аппаратуры, которая применяется в известных национальных и международных космических программах. Датчики обладают наивысшей надежностью и точностью измерений в экстремальных условиях эксплуатации: при воздействии вибраций, ударов, линейных ускорений высоких уровней, высоких и низких температур, различных агрессивных сред, а также сейсмостойкостью, стойкостью к воздействию радиационных факторов, имеют минимальные габаритно-массовые характеристики. Разнообразна номенклатура производимых ДД: датчики абсолютного давления (ДАВ, ДАИ, Вт, ДАЭ), разности (ДРЕ, ДРИ) и перепада (СО41) давлений, избыточных давлений (ДНИ, ДДЭ, ДХП, Вт, ДСЕ), быстропеременных давлений (ДПС, ЛХ,

Вт), акустических давлений (ДХС, ЛХ), датчики для атомных электростанций (ДМВ, СДНК, НВ 005). Диапазон измерения давлений составляет 0 – 300 МПа. Большинство ДД основаны на тонкопленочных чувствительных элементах на мембране из металла. Диапазон рабочих температур различных датчиков от –196 до +250 °С, погрешность измерений во всем диапазоне температур до 0,5 %, выходной сигнал от единиц милливольт до 5,5 В. Сами ДД заключены в металлические корпуса из стойкой к агрессивным средам стали, предусмотрена работа с преобразователями, с цифровой и светодиодной индикацией, а также с частотным выходом.

Перед разработчиками микроэлектронных ДД возникает множество проблем на каждом этапе: выбор метода преобразования давления; создание упругого элемента; выбор чувствительного элемента и его структуры; выбор схемы вторичной обработки сигнала с устройством вывода и сопряжения; выбор конструкции датчика и т. д. При этом необходимо учитывать жесткие требования заказчика: условия эксплуатации; допустимая погрешность измерений; конструктивное оформление; простота в обслуживании, взаимозаменяемость и ремонтпригодность; долговременная стабильность параметров; минимальная стоимость и др.

Для работы в экстремальных условиях при воздействии различных дестабилизирующих факторов (температура, вибрации, ускорения, нестабильность источников питания и др.) пригодна лишь незначительная часть датчиков. Особое место среди факторов, оказывающих сильное влияние на параметры и выходные точностные характеристики датчиков давления, занимает температура. Чтобы компенсировать температурную погрешность ДД, используют различные методы: конструктивные, технологические, схемные и др. В последние годы в связи с бурным развитием компьютерной и микропроцессорной техники большой популярностью пользуется обработка сигналов датчиков с помощью микропроцессоров, способных корректировать характеристики выходных сигналов датчиков с учетом нелинейности преобразования, температуры и т. д. Однако применение микропроцессоров требует дополнительных операций по градуировке и перепрограммированию их под каждый ДД в силу технологического разброса параметров датчиков, да и сами микропроцессоры представляют собой сравнительно сложные устройства, требующие соответствующей квалификации персонала, работающего с изделиями.

Анализ показывает, что перспективным направлением в создании микроэлектронных ДД с частотным выходом, устойчивых к воздейст-

вию стационарных и нестационарных температур, может быть интеграция тонкопленочных датчиков с частотными интегрирующими преобразователями, выполненными в виде интегральных микросхем. В этом случае возможно уменьшить температурную погрешность преобразования в диапазоне от  $-196$  до  $+165$  °С до  $0,25$  % (при воздействии нестационарных температур) и менее. Для создания таких датчиков давления имеются объективные предпосылки. При этом представляется возможным снизить (на порядок) энергопотребление измерительной цепи датчика, существенно улучшить по сравнению с микропроцессорными датчиками динамические характеристики, обеспечить инвариантность к нестабильности источников питания, повысить помехоустойчивость при передаче сигнала как по проводным, так и беспроводным линиям связи. Такие микроэлектронные ДД с частотным выходом могут использоваться в распределенных системах сбора и обработки информации, они требуются для развития ракетной и авиационной техники. При этом отпадает необходимость в сложных микропроцессорных устройствах и АЦП, устанавливаемых в каждом датчике. С применением нового класса микроэлектронных датчиков давления с частотным выходом, устойчивых к воздействию стационарных и нестационарных температур в широком диапазоне, значительно повысится надежность информационно-измерительных и управляющих систем.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Мокров Е. А.** Проблемы и перспективы развития датчиковой аппаратуры // Микросистемная техника. 2003. № 9. С. 11 – 17.
2. **Белозубов Е. М.** Перспективные тонкопленочные тензорезисторные датчики давления для ракетной и авиационной техники // Измерительная техника. 2004. № 5. С. 37 – 41; **Belozubov E. M.** Promising thin-film strain-resistor pressure sensors for rocket and aviation techniques // Measurement Techniques. 2004. V. 47. N 5. P. 474–480.
3. **Васильев В. А., Громков Н. В.** Датчики давления отечественных и зарубежных производителей // Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе: Приложение к журналу «Открытое образование». М.: Моск. госуд. акад. приборостроения и информатики. 2009. С. 176 – 178.
4. **Фрайден Дж.** Современные датчики. Справ. издание. М.: Техносфера, 2006.
5. **Джексон Р. Г.** Новейшие датчики. М.: Техносфера. 2008.
6. **Euroensors XII** // Proc. 12<sup>th</sup> Europ. Conf. on Solid-State Transducers and the 9<sup>th</sup> UK Conf / on Sensors and their Applications / Ed. N. M. White. U.K.: Inst. of Physics Publ. Ltd., Univ. of Southampton, 1998.

7. **OMEGA** Eng. Inc. HANDBOOK UCA., Connecticut: Stamford, 2007.
8. **KULITE** Semiconductor Prod. Inc. HANDBOOK. New Jersey: Leonia, 2006.
9. **Measurement** Microsystems // IEEE Instrum. & Measur. Magazine. 2004. V. 7. Iss. 2. P. 4–62.
10. **Henry Helvajian**. Microengineering Aerospace Systems // Abstr. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. Reston, Virginia. California: Aerospace Press El Segundo, 2004.
11. **18<sup>th</sup> IEEE** Intern. Conf. micro electromechanical systems, Istanbul, 2006.
12. **Мокров Е. А., Блинов А. В.** Состояние и перспективы развития датчиков, преобразователей физических величин и компонентов датчиков для систем измерения, контроля, управления и диагностики // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: Труды Междунар. науч.-техн. конф. Пенза: ПГУ, 2008. С. 148–151.
13. **Кузеев Е. В.** Датчики давления фирмы Metallux // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2006. № 2. С. 76–78.
14. **Цыганов В. Ю.** Стандарт для ответственных применений. Датчики давлений «Rosemount 3051» // Датчики и Системы. 2008. № 3. С. 52–56.
15. **Белозубов Е. М., Васильев В. А., Громков Н. В.** Тонкопленочные нано- и микроэлектромеханические системы – основа современных и перспективных датчиков давления для ракетной и авиационной техники // Измерительная техника. 2009. № 7. С. 35–38; **Belozubov E. M., Vasil'ev V. A., Gromkov N. V.** Thin-film nano- and micro-electromechanical systems – the basis of contemporary and future pressure sensors for rocket and aviation engineering // Measurement Techniques. 2009. V. 52. N 7. P. 739 – 744.
16. **Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е.** Тонкопленочные тензорезисторные датчики давления – изделия нано- и микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 12. С. 49–51.
17. **Белозубов Е. М., Васильев В. А., Громков Н. В.** Проблемы и основные направления исследований тонкопленочных нано- и микроэлектромеханических систем датчиков давления // Датчики и системы. 2009. № 8. С. 54–58.
18. **Белозубов Е. М., Васильев В. А.** Нано- и микроэлектромеханические системы тонкопленочных датчиков давления. Принципы построения и перспективы исследований // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. № 9. С. 26–32.
19. **ОАО «НИИФИ»** [офиц. сайт]. <http://www.niifi.ru> (дата обращения: 10.03.2010).

*Дата принятия 29.04.2010 г.*