

Датчики

переменного давления

Первичным звеном, регистрирующим и передающим информацию о давлении среды, служит датчик давления, представляющий собой конструктивно завершённый прибор.

Сфера применения датчиков давления чрезвычайно широка: энергетика, автомобилестроение, авиационная и ракетно-космическая техника, судостроение, атомная техника, взрывные технологии, физические эксперименты. Активно употребляются датчики давления при экспериментальной отработке и штатной эксплуатации летательных аппаратов и двигательных установок: по данным отечественных и зарубежных источников, измерения давления составляют примерно половину всех наземных и около трети лётных измерений в ракетно-космической отрасли.

В современных датчиках давления давление преобразуется в перемещение или силу упругими чувствительными элементами – мембранами, мембранными и anerоидными коробками, сильфонами и колпачками. Для измерения переменных давлений, как правило, используются пьезо- и тензорезистивные, пьезоэлектрические и ёмкостные преобразователи.

МЭМС-технологии

Интенсивное развитие в мире в настоящее время получают микроэлектромеханические системы (МЭМС) [1]. Применительно к датчикам переменного давления МЭМС реализованы для пьезорезистивной и ёмкостной схем. Разработкой МЭМС-датчиков давления в России занимаются ФГУП «Научно-исследовательский институт физических измерений (НИИФИ) (г. Пенза), ОАО «ТЕМП-АВИА» (г. Арзамас) и ряд технологических центров, например Московский государственный институт электронной техники (МИЭТ). Применение МЭМС-датчиков давления стремительно расширяется, например в автомобилестроении [2, 3], и будет расти ещё интенсивнее в других отраслях – робототехнике, автоматизации технологических процессов и т.д.

Большая часть существующих в настоящее время электронных компонентов эксплуатируется при максимальной рабочей температуре до 200°C из-за ограничений, на-

А.А. Симчук
ООО «ГлобалТест»,
г. Саров Нижегородской обл.

Ключевые слова: датчик переменного давления; МЭМС-технологии; пьезорезистивный датчик; тензорезистивный датчик; пьезоэлектрический датчик

лагаемых используемыми при их изготовлении традиционными материалами (особенно кремнием). Надёжная архитектура приборов на основе технологии КНД (кремний на диэлектрике) способна расширить рабочий температурный диапазон приборов до 450°C. Но при более высоких температурах конечным ограничивающим фактором для МЭМС-датчиков становится термомеханическая деформация кремния. Поэтому современной тенденцией в микроэлектронике является применение при разработке датчиков новых материалов, элементов, структур с уникальными техническими показателями.

Принцип работы пьезорезистивных и тензорезистивных датчиков давления основан на функциональной зависимости между измеряемым давлением и упругими деформациями чувствительного элемента, преобразующимися в сигнал полупроводниковыми, проводочными, фольговыми или металлоплёночными тензорезисторами. Тензометрический метод преобразования сочетает исключительную простоту с высокой надёжностью, что позволяет эксплуатировать датчики в сложных условиях. Однако датчики с проводочными или фольговыми тензорезисторами отличаются малым уровнем выходных сигналов. Кроме того, большинство существующих в настоящее время тензометрических дат-

чиков подобного типа имеют большие габаритные размеры и невысокую чувствительность, трудоёмки в изготовлении. Хотя современные технологии позволяют повысить тензочувствительность. Например, московская фирма "Сенсор" [4] выпускает датчики с полупроводниковыми тонкоплёночными чувствительными элементами непосредственно на металлической мембране (рис. 1). Это позволило в 50 раз повысить тензочувствительность в сравнении с традиционными NiCr-тензорезисторами.

Пьезорезисторы обладают чувствительностью на 1–2 порядка выше, чем у фольговых тензорезисторов, малым гистерезисом вследствие интегрального исполнения чувствительного элемента в виде КНС (кремний на сапфире) и КНД (кремний на диэлектрике) структур. Мембрана чувствительного элемента выполнена из монокристаллического материала (кремния или сапфира), в теле или на поверхности которого методом планарно-эпитаксиального анизотропного травления сформирована мостовая схема Уитстона. Пьезорезистивные датчики имеют малые габариты и массу. Современные технологии позволяют реализовать на одном кристалле вместе с упругим элементом измерительную и усиленную схемы. Несомненные достоинства пьезорезистивных датчиков: большой выходной сигнал (до 1 В), возможность создания конструкций с собственной частотой более 100 кГц, малые габариты и масса, высокая точность (основная погрешность не более 0,2%). К недостаткам можно отнести высокую стоимость и ограниченный температурный диапазон, не превышающий 200°C.

По типовой схеме пьезорезистивного датчика давления (рис. 2)

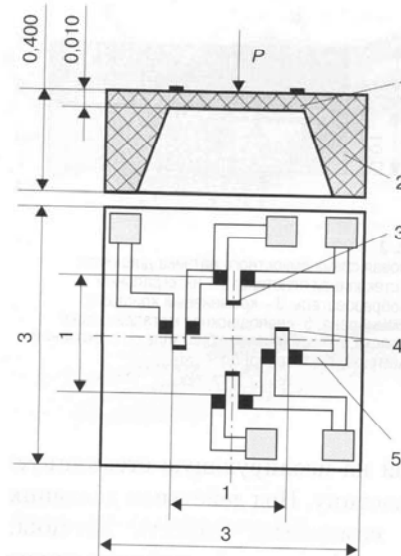


Рис. 2
Схема пьезорезистивного датчика давления:
1 — кремниевая диафрагма; 2 — кристалл;
3 — продольные резисторы; 4 — поперечные резисторы; 5 — металлизация

размещённые по краям мембраны диффузионные пьезорезисторы соединены в мостовую схему. При приложении давления мембрана изгибается, на её внешней поверхности возникают напряжения, вследствие чего меняются сопротивления тензорезисторов и выходное напряжение мостовой схемы. При малых размерах чувствительность и точность пьезорезистивных датчиков соответствуют аналогичным характеристикам лучших образцов датчиков давления, что позволяет использовать их в аэрокосмической промышленности, автомобилестроении, медицине.

Реализация схемы ёмкостного датчика давления (рис. 3) стала возможной благодаря развитию электроники и микромеханики. Упругая диафрагма используется как подвижная обкладка плоского конденсатора, перемещающаяся при приложении давления. Неподвижная обкладка конденсатора обычно формируется в виде тонкой металлической плёнки, напылён-



Рис. 1
Чувствительные элементы датчиков давления
ООО "Сенсор"

ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

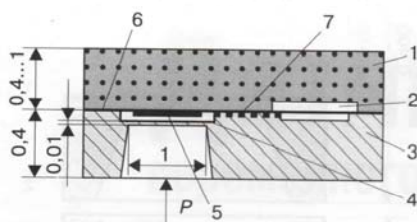


Рис. 3
Типовая схема ёмкостного датчика давления: 1 – стеклянная пластина; 2 – интегральный преобразователь; 3 – кремниевый кристалл; 4 – мембрана; 5 – неподвижная металлическая обкладка; 6 – соединение кристалла со стеклянной пластиной; 7 – токоподвод

ной на изолирующую стеклянную пластину. Под действием давления P изменяется ёмкость датчика. Толщина упругой мембраны лежит в диапазоне от одного до нескольких микрон. Площадь составляет несколько квадратных миллиметров.

Технология производства датчиков предполагает последовательное проектирование и изготовление пьезорезистивных чипов (рис. 4), сборку на их основе чувствительных элементов по МЭМС-технологии (рис. 5) и, наконец, корпусирование до конечной конструкции (рис. 6, 7, 8).

Наиболее известны следующие зарубежные производители пьезорезистивных датчиков давления: Kulite Semiconductor Products, Inc. (США), BCM Sensor (Бельгия), PCB (США), Endevco (США), Kistler (Швейцария) [5, 6, 7, 8, 9]. В России пьезорезистивные датчики давления разрабатывают и производят МИЭТ (г. Зеленоград) [10], НИИФИ (г. Пенза) [11].

Современные технологии микромеханики открывают большие возможности при построении информационно-измерительных систем. Но, несмотря на стремительное развитие МЭМС-технологий для пьезорезистивных, ёмкостных датчиков, их использование в на-

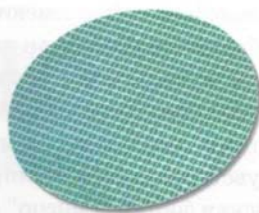


Рис. 4
Пьезорезистивный кремниевый чип для измерения давления



Рис. 5
Чувствительные элементы датчиков давления фирмы BCM



Рис. 6
Пьезорезистивный датчик BCM 615F



Рис. 7
Датчик ХТЕН-7Л-190 фирмы Kulite



Рис. 8
Датчик 1501B02 фирмы PCB

стоящий момент времени не обеспечивает всех потребностей промышленности вследствие ограничений по условиям эксплуатации. Практически единственной альтернативой при эксплуатации в жестких условиях, в частности в атомной энергетике, остаются пьезоэлектрические датчики переменного давления.

Пьезоэлектрические датчики давления

В технике измерений переменного давления наиболее широкое распространение получили пьезоэлектрические датчики (рис. 9). Измеряемое давление передается через мембрану 3, жесткий центр 2 на пьезоэлемент 1. Генерируемый пьезоэлементом 1 заряд через сигнальный вывод 4 передается на усилитель заряда и далее на регистрирующий прибор. Основное преимущество датчиков этого типа в сравнении с другими преобразователями переменных давлений – простота конструкции, надежность при эксплуатации в жестких условиях, возможность регистрации процессов с частотами до нескольких сотен килогерц, малые габариты и масса. Недостатком является

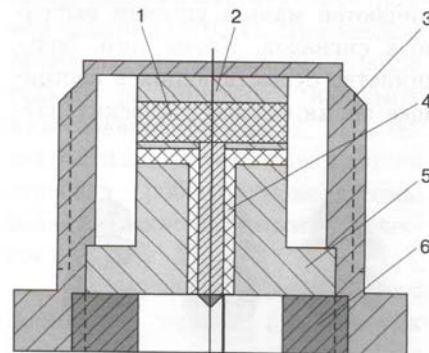


Рис. 9
Схема пьезоэлектрического датчика давления: 1 – пьезоэлемент; 2 – жесткий центр; 3 – мембрана; 4 – сигнальный вывод; 5, 6 – элементы корпуса



Рис. 10
Датчики 6203 и 7031 фирмы Kistler



Рис. 11
Датчики PS01 и PS02 ООО "ГлобалТест"



Рис. 12
Датчики 101A02 и 112A05 фирмы PCB

нечувствительность датчиков к постоянной составляющей давления. Нижняя частота регистрируемого давления 1...5 Гц.

Температурный диапазон пьезоэлектрических датчиков давления зависит от применяемых пьезоматериалов. Для кварцевых датчиков верхняя граница не превышает +350°C. Применение новых кристаллов, например ниобата лития, танталата лития, ортофосфата галлия, позволяет существенно расширить температурный диапазон датчиков до +900°C. Но обеспечение стабильности, а в основном линейности характеристики, требует тщательного проектирования с правильным выбором материалов. Сегодня в процессе проведения измерений при высоких температурах производители и потребители зачастую используют охлаждаемые конструкции.

В настоящий момент на российском рынке представлены пьезоэлектрические датчики давления (рис. 10, 11, 12) следующих производителей: PCB, Kistler, Vibrometer (Швейцария) [12], AVL (Австрия) [13], НИИФИ, ООО "ГлобалТест"

Таблица 1. Характеристики пьезоэлектрических датчиков, применяемых для взрывных и баллистических измерений

Параметр	Модель датчика		
	117B PCB	6203 Kistler	PS02 ГлобалТест
Чувствительность, пКл/бар	1,45	2	5
Динамический диапазон, бар	2500	5000	2500
Нелинейность, %	≤ 2	≤ 1	≤ 2
Собственная частота, кГц	> 300	> 170	> 200
Чувствительность к ускорению, бар/g	0,0015	0,01	0,001
Температурный диапазон, °C	200	200	200

Примечание: приведены характеристики датчиков с динамическим диапазоном до 5000 бар.

(Россия, г. Саров) [14], НТИИМ (Россия, г. Нижний Тагил).

Пьезоэлектрические датчики обеспечивают требования к измерениям в таких областях техники, как исследование быстропротекающих процессов в жестких условиях применения [15], высокотемпературная и криогенная техника, компрессоры, двигателестроение в диапазонах давлений $5...1 \cdot 10^9$ Па.

При выборе датчика для измерений быстропротекающих процессов (табл. 1) должна учитываться собственная частота датчика для обеспечения минимальной динамической погрешности. Чем боль-

ше собственная частота датчика, тем более короткие процессы может он регистрировать. На рис. 13, 14 представлены осциллограммы сигналов с пьезоэлектрических датчиков при взрывных экспериментах.

Высокотемпературные измерения проводятся пьезодатчиками с зарядовым выходом с последующей передачей сигнала через специальный малошумящий кабель к усилителю заряда и регистрирующей аппаратуре. Длина кабельной линии определяется соотношением ёмкостей датчика и кабеля и для большинства комбинаций не пре-

ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

Таблица 2. Параметры пьезоэлектрических датчиков, применяемых для диагностики ДВС

Параметр	Модель датчика					
	112A05 PCB	CP216 Vibrometer	7031 Kistler	7013 Kistler	PS01 ГлобалТест	GM12D AVL
Чувствительность, пКл/бар	15	200	-55	-40	20	15
Динамический диапазон, бар	345	250	250	250	250	200
Нелинейность, %	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 0,5	≤ 2	≤ 0,3
Чувствительность к ускорению, бар/g	0,0001	0,0025	0,0001	0,002	0,001	0,001
Температурный диапазон, °C	320	470	200	350	200	400

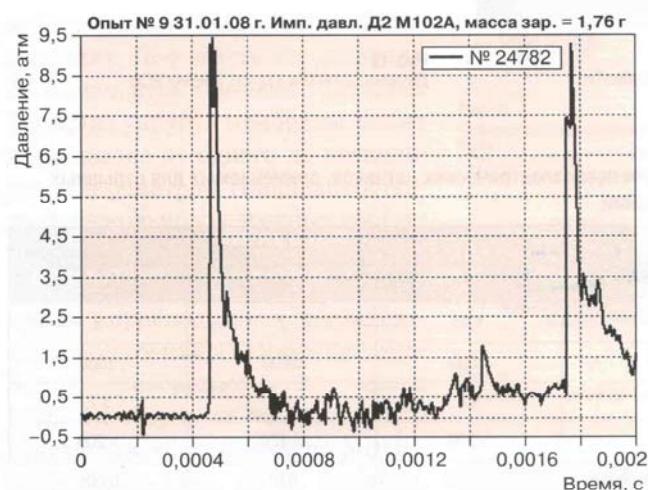


Рис.13
Осциллограмма сигнала с датчика M102 фирмы PCB

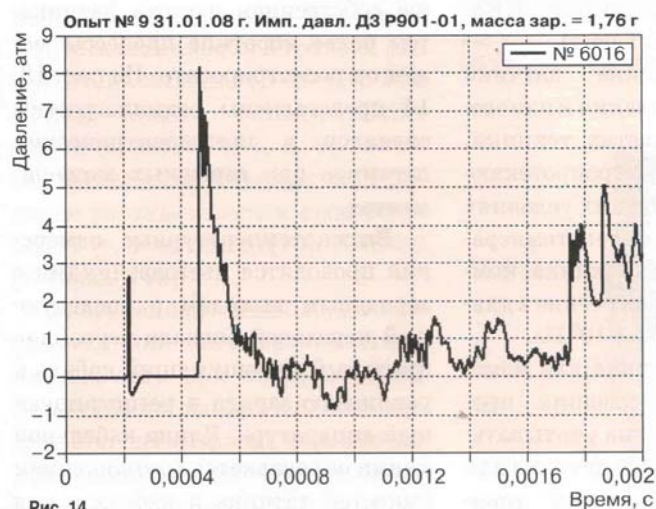


Рис. 14
Осциллограмма сигнала с датчика PS01 фирмы ООО "ГлобалТест"

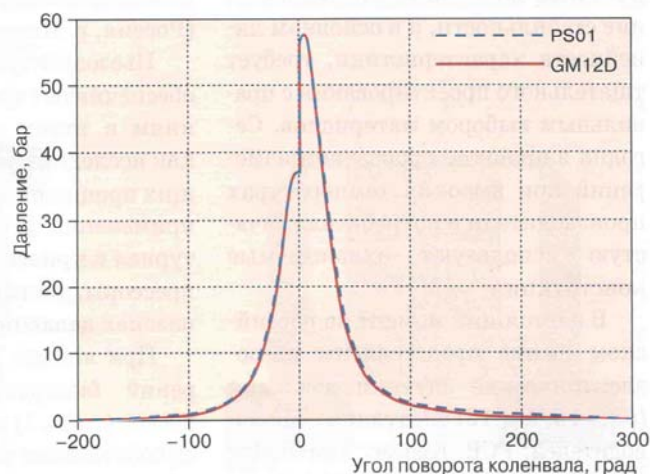


Рис. 15
Индикаторные диаграммы двигателя внутреннего сгорания

вышает 10 м. При температурах до 125°C целесообразно использовать пьезодатчики со встроенной электроникой, которые не требуют специального кабеля и усилителя заряда. Возможная длина измерительной линии увеличивается до 500 м. Стоимость измерительного канала в данном случае значительно уменьшается.

Незаменимы пьезоэлектрические датчики в системах диагностики двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Выбор датчика для целей диагностики ДВС (табл. 2) обусловлен заданными параметрами динамического и температурного диапазонов, линейности характеристики, чувствительности к ускорению. Большой температурный диапазон обеспечивается применением высокотемпературных пьезоматериалов, низкая чувствительность к ускорению – схемами виброкомпенсации.

На рис. 15 представлены типовые индикаторные диаграммы двигателя внутреннего сгорания КАМАЗ-5320, полученные с помощью измерительной системы "Алмаз" параллельно двумя датчиками – PS01 и GM12D.

Отдельного внимания заслуживает метрологическое обеспечение датчиков переменного давления [16]. К сожалению, в стране отсутствует система метрологического обеспечения средств измерений динамического давления. В 1980-е годы ленинградское НПО «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» разработало и оснастило ряд отечественных предприятий метрологическим оборудованием, но сейчас это оборудование в лучшем случае находится в складских помещениях.

Целесообразно приступить к «реанимации» отечественного метрологического оборудования в области обеспечения измерений динамического давления, а также разработать для датчиков переменного давления унифицированную методику поверки в виде документа рекомендательного характера. Кроме того, для применения в России датчиков переменного давления в сфере государственного метрологического надзора, а к таковому относятся все измерительные системы для опасных производственных объектов и оборонной промышленности, необходимо внесение их в Госреестр средств измерений.

Литература

1. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение, 2007.
2. Баринов И. Высокотемпературные тензорезистивные датчики давлений на основе карбида кремния. Состояние и тенденция развития // Компоненты и технологии. – 2010. – № 8. – С. 64–71.
3. Сысоева С. Введение в High-End сегменты применений MEMS-технологии // Компоненты и технологии. – 2010. – № 12. – С. 96–102.
4. Датчики и преобразователи давления: Каталог ООО «Сенсор». – Гатчина, 2006–2010.
5. Официальный сайт Kulite Semiconductor Products, Inc. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kulite.com/industryMain.asp>, свободный.
6. Официальный сайт BCM Sensor Technologies [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bcmsensor.com/main-categories.php?firstid=18>, свободный.
7. Официальный сайт PCB Piezotronics Inc. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pcb.com>, свободный.
8. Официальный сайт Endevco Corporation [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.endevco.com>, свободный.
9. Официальный сайт Kistler [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kistler.com>, свободный.
10. Официальный сайт Московского государственного института электронной техники [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://miet.ru>, свободный.
11. Датчики. Преобразователи. Системы: Каталог [Электрон. данные] // Официальный сайт НИИ физических измерений. – Режим доступа: http://www.niifi.ru/Catalogue_production.php, свободный.
12. Вибро-Метр // Сайт представительства компании «Вибро-Метер» в России [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vibro-meter.ru/>, свободный.
13. Официальный сайт компании AVL [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.avl.com>, свободный.
14. Измерительная аппаратура: Каталог. – Саров: ООО «ГлобалТест», 2011.
15. Кирпичёв А.А., Симчук А.А. Применение датчиков динамического давления: Тез. докл. 2-го Междунар. симп. «Механометрика 2010». – 2010. – С. 109–113.
16. Кирпичёв А.А., Симчук А.А., Верозубов С.Е., Смирнов В.Я. Проблемы разработки и испытаний датчиков динамического давления: Тез. докл. 2-го Междунар. симп. «Механометрика 2010». – 2010. – С. 104–109.



GlobalTest
ISO 9001:2008

ООО «ГлобалТест»

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Разработка

Производство

Метрологическое обеспечение

Удар

Вибрация

Акустическая эмиссия

Давление

Сила



607185, Нижегородская область, г. Саров,
ул. Павлика Морозова, д. 6
Телефон: (831-30) 6-42-56, 7-41-01
Факс: (831-30) 6-42-57
e-mail: mail@globaltest.ru
<http://www.globaltest.ru>

