



ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ТОМ IX

М.В. Богуш

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОТЕРМОУПРУГИХ МОДЕЛЕЙ



Под редакцией доктора технических наук,
профессора *А.Е. Панича*



ТЕХНОСФЕРА

Москва

2014

УДК 621.317.39
ББК 32.96-04
Б74

Печатается по решению научно-технического совета
НКТБ «Пьезоприбор» Южного Федерального университета.

Рецензенты:

Кручинский С.Г., д.т.н, профессор ТТИ ЮФУ
Горбатенко Н.И., д.т.н, профессор ЮРГПУ (НПИ).
Земляков В.Л., д.т.н, ЮФУ

Б74 Богуш М.В. **Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей.**
М.: Техносфера, 2014. – 312 с.+12 с. цв.вкл. ISBN 978-5-94836-371-4

Работа посвящена проектированию пьезоэлектрических датчиков с использованием современных методов математического моделирования. Описаны критерии, алгоритмы и процедуры для рационального и целенаправленного выбора конструкции датчика, материалов и размеров деталей с помощью универсальных относительно геометрии изделия и способов приложения нагрузки численных пространственных электротермоупругих моделей. Это позволяет улучшить технические характеристики пьезоэлектрических датчиков за счет обоснованного выбора компромисса между информативностью и надежностью изделия в предполагаемых условиях эксплуатации.

Эффективность предложенных методов подтверждается разработкой серии пьезоэлектрических датчиков с уникальными свойствами, нашедших широкое применение в вихревых и ультразвуковых расходомерах жидкости, газа и пара для систем промышленной автоматики.

Предназначена для специалистов, занимающихся проектированием и применением пьезоэлектрических преобразователей и датчиков в измерительных и управляющих системах, а также аспирантов и студентов технических вузов.

M.V. Bogush. **Design of piezoelectric sensors based on spatial electrical and thermoelastic models.** Technosfera publishing house, 2014, 325 p.: figures.

The book deals with the designing of piezoelectric sensors using modern methods of mathematic modeling. Criteria, algorithms and procedures for rational and efficient selection of the sensors structure, materials and sizes of the parts with the help of numerical spatial electrothermoelastic models that are multipurpose as to the geometry of the sensor and loading modes are described. This provides improving technical characteristics of piezoelectric sensors, due to a well-founded compromise between the information capacity and reliability of the product in the presumptive operation conditions.

The efficiency of the proposed methods is confirmed by the development of a series of piezoelectric sensors having unique properties for vortex and ultrasound flowmeters for fluids, gas and vapor that have been widely applied in the industry.

The book is designed for specialists engaged in design and application of piezoelectric transducers and sensors in measurement and control systems, as well as for students and post-graduate students of technical institutes of higher education.

УДК 621.317.39
ББК 32.96-04

© Богуш М.В., 2014
© ЗАО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2014
ISBN 978-5-94836-371-4



СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ	12
1.1. Пьезоэлектрические материалы для измерительной техники.....	12
1.2. Пьезоэлектрические датчики давления	16
1.2.1. Унифицированный ряд датчиков быстропеременных давлений	18
1.2.2. Датчики акустических давлений.....	22
1.2.3. Датчики давления ведущих зарубежных фирм	25
1.3. Методы анализа пьезоэлектрических датчиков.....	30
1.3.1. Структурный анализ.....	31
1.3.2. Аналитические методы	38
1.3.3. Численные методы	41
2. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ	45
2.1. Модель неоднородного чувствительного элемента.....	45
2.2. Распределение механических и электрических полей.....	56
2.3. Функция преобразования	60
2.4. Прочность при сжатии.....	63
2.5. Прочность при изменении температуры	68
2.6. Аддитивная погрешность при изменении температуры.....	70



3. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	73
3.1. Электроупругие модули	73
3.1.1. Динамический метод измерения электроупругих модулей	73
3.1.2. Квазистатический метод измерения пьезоэлектрических модулей	77
3.1.3. Полный набор электроупругих модулей	84
3.2. Изменение электроупругих модулей от температуры	86
3.3. Изменение пьезоэлектрических модулей от давления	88
3.4. Старение	90
3.5. Временные изменения свойств при внешних воздействиях	92
3.6. Тепловое расширение и пирозэффект	95
3.7. Прочность при сжатии и растяжении	104
4. ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ В РАБОЧИХ УСЛОВИЯХ	111
4.1. Методы оценки механической надежности.....	111
4.2. Оценка механической надежности при действии давления.....	113
4.2. Оценка механической надежности при действии давления и изменении температуры.....	118
4.3. Выбор материалов силопередающих элементов датчиков.....	127
4.4. Изменение коэффициента преобразования от температуры	130

4.5.	Повышение надежности пьезоэлектрических датчиков акустических давлений	137
5.	ОБЪЕМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ	143
5.1.	Аномальные явления в объемночувствительных преобразователях	143
5.2.	Изменение температуры среды при адиабатическом процессе	145
5.3.	Модель объемночувствительного преобразователя	147
5.4.	Экспериментальная проверка модели	153
5.5.	Контрольные датчики давления	158
5.6.	Виброзащищенные датчики давления	159
5.7.	Миниатюрные датчики давления	162
6.	МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ	166
6.1.	Постановка задачи электротермоупругости	166
6.2.	Сравнение аналитических и численных решений	169
6.3.	Методы анализа и синтеза пьезоэлектрических датчиков	176
6.4.	Анализ датчиков давления	181
6.4.1.	Коэффициент преобразования	184
6.4.2.	Собственные частоты	185
6.4.3.	Вибрационная и деформационная чувствительности	188
6.4.4.	Прочность в нормальных и рабочих условиях	191

6.4.5. Исследование путей оптимизации конструкции датчика.....	199
6.4.6. Основные характеристики пьезоэлектрических датчиков давления.....	204
6.4.7. Оценка информативности пьезоэлектрических датчиков давления с помощью обобщенного показателя качества.....	208
7. ПРИМЕРЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ	214
7.1. Анализ температурных напряжений в гидроакустических антеннах.....	214
7.2. Исследование АЧХ виброакустических датчиков.....	221
7.3. Пьезоэлектрические преобразователи для ультразвуковых расходомеров газа.....	225
7.4. Вибрационные сигнализаторы уровня.....	234
7.5. Универсальный вибрационный плотномер жидкости и газа	247
7.6. Датчики изгибающего момента для вихревых расходомеров	251
8. ВИХРЕВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ	264
8.1. Принцип действия вихревых расходомеров и основные требования к преобразователям энергии потока	264
8.2. Вихревые расходомеры жидкости	271
8.3. Вихревые расходомеры газа	275



8.4. Вихревые расходомеры пара	278
8.5. Вихревые расходомеры ведущих мировых фирм	282
8.6. Области применения вихревых расходомеров с пьезоэлектрическими датчиками.....	285
8.7. Тенденции развития вихревой расходомерии	287
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	290
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ.....	291
ЛИТЕРАТУРА	293



Список принятых сокращений

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика
ДИМ – датчик изгибающего момента
КЛТР – коэффициент линейного теплового расширения
КП – коэффициент преобразования
МКЭ – метод конечных элементов
ОПК – обобщенный показатель качества
ОЧП – объемно-чувствительный преобразователь
ПДД – пьезоэлектрический датчик давления
ПКМ – пьезокерамический материал
ПЭ – пьезоэлемент
СПЭ – силопередающий элемент
СУ – сигнализатор уровня
СФА – структурно-функциональный анализ
ТВ – титанат висмута
ТНВ – титанат-ниобат висмута
ТР – тепловое расширение
ЦТС – цирконат-титанат свинца
ЧЭ – чувствительный элемент
ЭВМ – электронно-вычислительная машина



ВВЕДЕНИЕ

В мировой практике для контроля динамических процессов в качестве первичных преобразователей информации измерительных и управляющих систем широко применяются пьезоэлектрические преобразователи и датчики. Номенклатура параметров, измеряемых с их помощью, в различных областях науки и техники исключительно разнообразна. С их помощью контролируются акустические и быстропеременные давления, ускорения, усилия, вибрации, удары, объемный и массовый расход, уровень и другие физические величины. Они обладают широкими динамическими и частотными диапазонами, малыми размерами, высокой надежностью, не требуют источников питания. В настоящее время датчики на основе пьезоэлектрических элементов выпускаются более чем 30 фирмами в мире.

Как правило, пьезоэлектрические датчики работают в жестких условиях эксплуатации при высоких и низких температурах, квазистатических и динамических давлениях, линейных ускорениях, акустических шумах, механических и гидравлических ударах, агрессивных и криогенных средах. При этом датчик должен иметь механическую прочность и действовать дольше, чем агрегат, в котором он установлен, и одновременно — как измерительное устройство должен обладать гарантированными метрологическими характеристиками при воздействии всех дестабилизирующих факторов.

Большой вклад в развитие пьезоэлектрического приборостроения внесли российские и советские ученые Н.А. Бойков, И.А. Глозман, И.П. Голямина, А.В. Гориш, Р.Г. Джагунов, В. Домаркас, В.П. Дунаевский, А.А. Ерофеев, Ю.А. Иориш, Р. Кажис, О.П. Крамаров, Б.В. Малов, Е.А. Мокров, И.В. Новицкий, А.Е. Панич, С.И. Пугачев, А.И. Трофимов, А.М. Туричин, Ю.А. Устинов, Р.К. Цеханский, В.М. Шарапов, Э. Бауман. Среди зарубежных ученых отметим Д. Берлинкура, Е. Кекучи, У. Кука, У. Кэди, Д. Керрана, У. Мэзона, Дж. Ная, Н. Нуберта, Б. Яффе, Г. Яффе и др.

Вопросы проектирования датчиковой аппаратуры для специальных условий эксплуатации являются исключительно



сложными. Имеется значительное число публикаций, в которых рассматриваются методы проектирования пьезоэлектрических датчиков, основанных, как правило, на одномерных моделях и ограничивающихся нормальными условиями. В тех же случаях, когда требуется обеспечить работу датчика в заданном диапазоне температуры и давления, рекомендации имеют качественный характер, а принимаемые технические решения часто базируются только на опыте и интуиции разработчика и не являются оптимальными, особенно в тех случаях, когда требуется создание принципиально новых изделий. Поэтому требуемые технические параметры или вообще не достигаются, или достигаются за счет снижения информативности или надежности приборов.

Сложность анализа пьезоэлектрических устройств, наряду с очевидной пространственной конфигурацией конструкции, обусловлена следующими причинами: их принципиальной неоднородностью, анизотропией свойств, связностью механического, электрического и теплового состояний.

Несмотря на бурное развитие в последние годы численных методов расчета пьезоэлектрических устройств, публикации в основном относятся к электроупругим задачам и исследованиям их амплитудно-частотных характеристик. В работах, посвященных электротермоупругим задачам, рассматриваются лишь общие подходы к их решению без анализа каких-либо геометрических моделей и количественных оценок.

Во многом это связано с отсутствием сведений о таких характеристиках ПКМ, применяемых в измерительной технике, как полный набор электроупругих модулей, тепловое расширение, пироккоэффициенты и др., а способы их измерений сложны и не всегда технически осуществимы.

В настоящей книге описаны новые методы анализа и синтеза пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей, обеспечивающих улучшение их технических характеристик.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- 1) Разработаны математические модели, рассматривающие датчики как единое пространственное электротермо-



- упругое тело (а не набор конструктивных элементов), испытывающее действие информационного параметра и комплекса влияющих факторов в заданных условиях эксплуатации.
- 2) Разработаны новые методы испытаний и проведены исследования характеристик пьезокерамических материалов, необходимых для расчетов в рамках созданных математических моделей.
 - 3) Разработаны новые методы оценки метрологических характеристик и механической надежности пьезоэлектрических датчиков с учетом влияния наиболее критичных дестабилизирующих факторов.
 - 4) Разработана серия пьезоэлектрических датчиков с уникальными свойствами, использующихся в вихревых и ультразвуковых расходомерах и других приборах.

В книге обобщен опыт конструкторско-технологических работ, проводимых на протяжении последних 40 лет в НКТБ «Пьезоприбор» Ростовского госуниверситета (ныне ЮФУ) совместно с ФГУП НИИ физических измерений г. Пенза по созданию пьезоэлектрических преобразователей и датчиков для ракетно-космической техники страны, вихревой и ультразвуковой расходомерии и других сфер применения. Наряду с результатами теоретических и экспериментальных исследований приведены конструкции и технические характеристики различных пьезоэлектрических датчиков, нашедших применение в промышленности, а также приборов контроля расхода энергоносителей на их основе.

Автор выражает благодарность и глубокую признательность всем, кто принимал участие в определении направлений работ, теоретических расчетах, экспериментальных исследованиях, разработке пьезоэлементов и датчиков и внедрении их в практику. Это прежде всего Крамаров Олег Павлович — создатель и первый директор ОКБ «Пьезоприбор», главный ученый секретарь НТК «Роскосмос» Гориш Анатолий Васильевич, генеральный директор — главный конструктор ФГУП НИИ физических измерений Мокров Евгений Алексеевич, директор — главный конструктор НКТБ «Пьезоприбор» Панич Анатолий Евгеньевич и многие другие.



I. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ

1.1. Пьезоэлектрические материалы для измерительной техники

Пьезоэлектрическими называются материалы, электризующиеся под действием механических напряжений (прямой пьезоэффект) и деформирующиеся в электрическом поле (обратный пьезоэффект) [1–4]. Пьезоэлектриками являются многие кристаллические вещества: кварц, ниобат лития, турмалин, пьезокерамики: титанат бария, цирконат-титанат свинца, титанат висмута, а также пленочные текстуры.

Общее количество выпускаемых во всем мире ПКМ с различными свойствами, рассчитанных на всевозможные применения, достигает порядка 150. Лидирующее положение в выпуске ПКМ и ПЭ занимают Япония и США, на долю которых приходится около 80% мирового рынка. Среди зарубежных фирм-производителей отметим «Piezosystems», «General Electric», «Burleigh», APC Piezotronics (США), «Matsushita», «Shinsei» (Япония), «Morgan Matroc» (Великобритания), «Siemens» (Германия), «Ferrogperm» (Дания). В России исследованиями в области пьезоэлектрического материаловедения и выпуском ПЭ занимаются ОАО «Аврора» (Волгоград), ОАО «Элпа» (Зеленоград), НКТБ «Пьезоприбор» и НИИ физики ЮФУ (Ростов-на-Дону) [5].

Среди множества пьезоэлектрических материалов (ПКМ) рассмотрим те, которые нашли широкое применение в измерительной технике. Особенностью этих материалов является сочетание высокой эффективности со стабильностью характеристик при сильных внешних воздействиях. Для удовлетворения этим противоречивым требованиям применяются как пьезоэлектрические кристаллы, так и ПКМ на основе различных химических соединений, отличающиеся температурой Кюри, величинами пьезоэлектрических, упругих и диэлектрических модулей и стабильностью их от температуры, давления и других влияющих факторов.

В связи с этим при проектировании датчиков первостепенное значение имеет рациональный выбор пьезоэлектрического ма-



териала, наилучшим образом подходящего для решения поставленной задачи. В настоящее время в отечественной и зарубежной измерительной технике широко используются различные группы пьезоэлектриков, которые проще всего классифицировать по точке Кюри или диапазонам рабочих температур, что во многом определяет весь набор их характеристик, таблица 1.1 [6–10].

К первой из них можно отнести ПКМ на основе многокомпонентных систем цирконата-титаната свинца ЦТС-19, ПКР-1, ПКР-7А, ЦТС-26, ЦТС-83Г (Россия) и PZT-5А, составы 841, 850, 855 (США). Эти материалы обладают высокими пьезоэлектрическими модулями и стабильностью свойств при изменении температуры от минус 60 до 150...300 °С.

Причем чем выше температура Кюри и диапазон рабочих температур, тем ниже пьезомодули материала. Пьезоэлементы (ПЭ) из керамики ЦТС применяются в датчиках для измерения акустических давлений, малых быстропеременных давлений и в высокочувствительных акселерометрах.

Ко второй группе относятся ПКМ на основе модифицированных титаната висмута ТВ-2, ТВ-3 [11] и титаната-ниобата висмута ТНВ-1 [12] (Россия), P14, P15 (США) [13]. Материалы этой группы характеризуются сравнительно низкими пьезомодулями, но высокой стабильностью свойств при действии статических давлений и изменении температуры от минус 253 до 500–700 °С. На основе этих ПКМ разрабатываются ПЭ для датчиков быстропеременного давления, высокотемпературных акселерометров [14–21].

В зарубежной и отечественной измерительной технике наряду с ПКМ широкое применение находят кристаллы кварца, турмалина, ниобата лития, лангасита [22–26].

Ведутся работы по созданию материалов с более высокой термостойкостью на основе ниобата натрия и метаниобата лития [27, 28]. В таблице 1.1 приведены сведения о керамике ПКР-61 на основе метаниобата лития с точкой фазового перехода более 1200 °С.

Этот ПКМ, мало уступая кристаллам ниобата лития по чувствительности, существенно превосходит его по прочности и стабильности характеристик в рабочих условиях. ПЭ из керамики ПКР-61 являются перспективными для создания датчи-

Таблица 1.1. Основные свойства пьезоэлектрических материалов для измерительной техники

Марка	Страна, фирма	Точка Кюри, °С	Диэлектрическая проницаемость	Пьезомодуль, d_{33} , пКл/Н,	Рабочая температура, °С	Максимальное давление, МПа	Изменения пьезомодуля, %, не более при действии			
							Т	Р	Т и Р	Т и Р
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10
ЦТС-19	Россия	280	1600	300	-60...200	-	+30	-	-	-
ПКР-1	Россия, РФУ	355	700	250	-60...200	-	-	-	-	-
ПКР-7М	Россия, РФУ	170	5000	750	-60...60	-	-	-	-	-
PZT-5A	США	300	1800	350	-60...150	-	-	-	-	-
841	США	320	1350	300	-60...160	-	-	-	-	-
850	США	360	1750	400	-60...180	-	-	-	-	-
855	США	250	3300	630	-60...120	-	-	-	-	-
ЦТС-26	Россия	350	1400	270	-60...250	-	+20	-	-	-
ЦТС-83Г	Россия, НКТЬ ПП	360	1200	220	-60...300	-	+25	-	-	-
ЦТС-Б	Россия, НКТЬ ПП	360	800	150	-196...300	10	+20...-20	-10	±15	±15
Кварц	США, РСВ Piezotronic	576	4,5	2,3	-196...260	-	±1,5	-	-	-
Кварц	Швейцария, Кистлер	576	4,5	2,3	-196...350	5300	±3	-	-	-
ТВ-2	Россия, НКТЬ ПП	650	160	13	-196...500	300	+40...-15	-15	±15	±15
ТВ-3	Россия, НКТЬ ПП	650	170	14	-196...600	300	+30...-15	-15	±15	±15
P14	США, Эндевко	650	175	15	-196...600	300	±15	-10	±10	±10
Турмалин	-	>1000	-	2,1	-196...700	-	±5	-	-	-
ТНВ-1	Россия, РФУ	930	110	8	-196...700	150	+20...-10	-10	±15	±15
P15	США, Эндевко	950	-	10	-60...800	10	±20	-	-	-
ПКР-61	Россия, РФУ	1200	35±5	10	-196...900	150	+20...-30	-20	±25	±25
LiNbO3	-	1200	35±5	18	-196...900	10	±35	-	-	-
Лангасит	Россия	>1200	-	3,5	-196...900	-	±10	-	-	-

ков механических величин, работоспособных до температуры 1000 °С без принудительного охлаждения. По техническому уровню отечественные ПКМ соответствуют лучшим зарубежным образцам. Они, хотя и уступают кристаллам по стабильности параметров к внешним воздействиям, но обладают существенно более высокой чувствительностью в более широком диапазоне рабочих температур.

При выборе материала ПЭ для измерительных преобразователей, как правило, принимаются во внимание такие характеристики ПКМ, как величина пьезомодуля, диэлектрической проницаемости, модуля Юнга, температуры Кюри, стабильность свойств при изменении температуры и давления, удельное объемное сопротивление в нормальных и рабочих условиях. Эти характеристики ПКМ в основном отражены в таблице 2.1, и их вполне достаточно для анализа датчиков в рамках одномерных моделей и ориентировочной оценки ожидаемых параметров при проектировании.

Для анализа характеристик пьезоэлектрических изделий с помощью пространственных электротермоупругих моделей необходим большой объем сведений о параметрах материалов. Для металлов и других конструкционных материалов необходимые сведения, как правило, известны и отражены в справочной литературе. Для ПКМ такие сведения, как полный набор электроупругих модулей, тепловое расширение, математическое ожидание и дисперсия прочности, часто отсутствуют. Анизотропия и связность упругого и электрического состояний являются причиной большого количества независимых коэффициентов, которые необходимо учитывать для однозначного описания их свойств.

Существующие методы измерений электроупругих модулей ПКМ сложны, трудоемки и не всегда технически осуществимы. Принципиальной проблемой является изготовление образцов в виде поляризованных по длине стержней значительных размеров, что делает невозможным применение традиционных методов, приемлемых для изотропных материалов. Изучению свойств ПКМ посвящено значительное количество работ. Однако большинство из них относятся к соединениям типа перовскита на основе титаната бария и ЦТС. Для ПКМ системы титаната висмута (ТВ) и титаната-ниобата висмута (ТНВ) приводятся лишь

те параметры, которые могут быть измерены на образцах в виде тонких дисков [29].

В связи с этим важной задачей является совершенствование методов испытаний и комплексные исследования характеристик ПКМ, применяемых в измерительной технике. Это необходимо для более достоверного количественного анализа ожидаемых параметров пьезоэлектрических датчиков в рамках пространственных электротермоупругих моделей.

1.2. Пьезоэлектрические датчики давления

Классификация пьезоэлектрических преобразователей исходя из физического принципа действия приведена в книге [30]. Согласно этой классификации все пьезоэлектрические устройства делятся на три группы:

1. Преобразователи, использующие прямой пьезоэффект и применяемые в приборах для измерения параметров механических процессов, в том числе: силы, акустического и быстропеременного давления, линейных и угловых ускорений, а также вибрации, ударов [4, 30–37].
2. Преобразователи, использующие обратный пьезоэффект и применяемые в качестве излучателей ультразвука в гидроакустике и дефектоскопии, преобразователях напряжения в перемещение (пьезодвигатели и пьезореле) для юстировки зеркал оптических приборов и исполнительных элементов систем автоматики [2, 4, 7, 38, 39].
3. Преобразователи параметрического типа, использующие одновременно прямой и обратный пьезоэффекты — пьезоэлектрические резонаторы, наиболее эффективно излучающие и принимающие энергию на фиксированной резонансной частоте. Пьезорезонаторы применяются в полосовых фильтрах, линиях задержки, преобразователях перемещения или присоединенной массы в частоту для датчиков уровня, плотности и др. [3, 4, 7, 40].

Достоинствами пьезоэлектрических преобразователей являются высокая линейность характеристик, широкие динамиче-

ские и частотные диапазоны, простота конструкции и высокая надежность при эксплуатации.

За рубежом лидерами в данной области техники являются: PCB Piezotronic JNG, Endevco Corporation, DYTRAN, Sanstard Date contrl (США), Erich Broza, Rheometron (Германия), Flopetron, C.F.V. LTD (Франция), Mullard Ltd, Merles, Motoroia JNG, AVL — (Великобритания), Kistler Instrument AG, Vibrometer (Швейцария), Hans List (Австрия), Bruel & Kjaer (Дания).

Ведущими предприятиями в России по разработке и выпуску пьезоэлектрических датчиков давления (ПДД) являются НИИ физических измерений, г. Пенза, ЦНИИМАШ, г. Королев, НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, ООО Пьезоэлектрик, Ростов-на-Дону.

Ввиду того, что области использования пьезоэлектрических преобразователей весьма обширны и разнообразны, ограничим рассмотрение подробным описанием пьезоэлектрических датчиков давления.

Большое разнообразие датчиков для измерения давления объясняется тем, что понятие давления охватывает протяженную область значений — от глубокого вакуума до сверхвысоких избыточных давлений в различных средах: газообразных (микрофоны), жидких (гидрофоны) и твердых (датчики акустической эмиссии) [31, 35]. В то же время развитие ряда отраслей техники, таких как авиационная, космическая, атомная энергетика, нефтепереработка и др., поставило задачу измерения динамических и импульсных давлений в экстремальных условиях эксплуатации и привело к созданию специальных классов пьезоэлектрических датчиков акустических и быстропеременных давлений [14–17].

Значительное развитие пьезоэлектрического приборостроения наблюдается в последние годы в результате разработок новых пьезокерамических материалов на основе слоистых сегнетоэлектриков с температурой Кюри 700...960 °С [16–19]. По сравнению с кристаллами кварца, турмалина и др. эти материалы обладают более высокой чувствительностью, более широким диапазоном рабочих температур и практически не уступают кристаллам по стабильности параметров к влияющим факторам.

1.2.1. Унифицированный ряд датчиков быстропеременных давлений

Датчиками быстропеременных давлений называются датчики, предназначенные для измерения динамических давлений на фоне медленно меняющихся статических давлений [31].

Разработка унифицированного ряда малогабаритных датчиков быстропеременных давлений впервые в нашей стране была проведена специалистами НИИ физических измерений, г. Пенза (НИИФИ) под руководством Е. А. Мокрова [15]. ПЭ к этим датчикам разработаны в НКТБ «Пьезоприбор» РГУ, г. Ростов-на-Дону [20].

Базовая конструкция унифицированного ряда малогабаритных пьезоэлектрических датчиков быстропеременных давлений показана на рис. 1.1 [14].

Датчик содержит основание, состоящее из двух герметично сваренных между собой деталей 6, 7, мембрану 13, выполненную за одно целое с корпусом 5, ЧЭ, содержащий ПЭ 3, изолятор 2 и пята 1, токосъемники 11 и кабель 8 с разъемом типа РС4ТВ. Кабель через гермопереход 9 и токосъемники 11 соединен с ПЭ 3. ЧЭ закреплен на основании с помощью тонкостенного колпачка 12. Мембрана имеет диаметр 6,0 мм. Ее толщина в зависимости от максимального рабочего давления датчика выбирается в пределах от 0,12 до 0,4 мм. Прокладка 4 обеспечивает герметичность стыка между датчиком и изделием, в котором он используется. В ЧЭ используются от 1 до 6 ПЭ. Все датчики имеют диаметр мембраны 6 мм и установочную резьбу М10х1 мм.

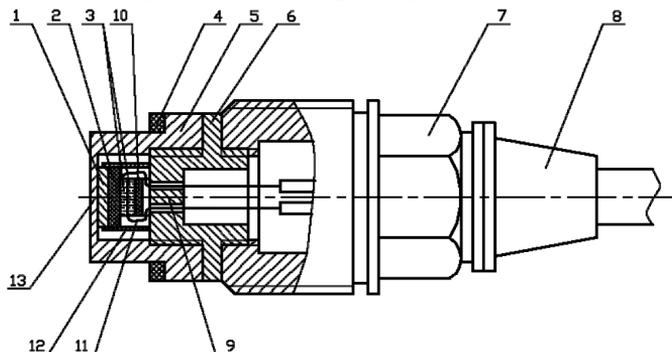


Рис. 1.1. Базовая конструкция малогабаритного датчика
быстропеременных давлений ДПС011

Унифицированная конструкция ПЭ показана на рис. 1.2 [20].

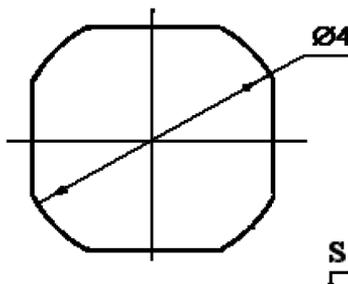


Рис. 1.2. Унифицированная конструкция ПЭ для малогабаритных датчиков быстропеременных давлений

Основные технические характеристики ПЭ приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Основные характеристики ПЭ для датчиков давлений

Характеристика	Условная марка		
	ПЭСД-20	ПЭСД-21	ПЭСД-22
Коэффициент преобразования силы в заряд, пКл/Н, не менее	100	12	5
Диапазон рабочих температур, °С	-196...300	-196...300	-60...700
Изменение коэффициента преобразования от температуры и давления, %, не более	±15	±15	±20
Диапазон статических давлений, МПа	0–0,5	0–200	0–100
Изменение коэффициента преобразования от давления, %, не более	±10	±10	±10
Собственная частота, кГц, не менее	300	300	300
Диаметр, мм, не более	4,0	4,0	4,0
Сопrotивление изоляции, Ом, не менее			
в нормальных условиях	10^{12}	10^{12}	10^{10}
в рабочих условиях	10^7	10^7	10^4

ПЭ имеют форму дисков с боковыми срезами. Наличие срезов позволяет осуществлять электрическую коммутацию ПЭ в датчике в пределах габарита 4 мм. Electroды ПЭ выполнены из вожженного серебра или платины. ПЭ имеют 3 модификации из различных ПКМ, отличающихся чувствительностью, диапазонами рабочих давлений и температур. Пьезоэлементы ПЭСД-20 предназначены для датчиков сверхмалых давлений, ПЭСД-21 — для датчиков малых и средних давлений, ПЭСД-22 — для высокотемпературных датчиков.

Основные технические характеристики малогабаритных датчиков быстропеременных давлений приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3. Основные характеристики малогабаритных датчиков быстропеременных давлений

Тип датчика	Диапазон измеряемых давлений, МПа	Диапазон статических давлений, МПа	Частотный диапазон, Гц	Коэффициент преобразования 10^{-5} пКл/Па (мВ/Па)	Погрешность, %, не более	Температура измеряемой среды, °С	Масса, кг
ДПС 009	0,05–5,6	2,8–63	2–50000	5	4	-196...200	0,02
ДПС 010	0,12–5,6	11–125	2–50000	3	4	-196...200	0,02
ДПС 011	0,005–0,5	0,05–5,6	2–50000	14	4	-196...200	0,02
ДПС 012	0,05–5,6	2,8–63	40–50000	(1,3)	8	-60...700	0,04
ДПС 013	0,005–0,5	0,05–5,6	40–50000	(2,5)	8	-60...700	0,04
ДПС 014	0,12–5,6	22,4–125	40–50000	(1)	8	-60...700	0,04

Высокий технический уровень датчиков, малые габариты и работоспособность при высоких температурах определяется комплексом конструктивных и технологических решений [15–17]:

- 1) выполнение ЧЭ на основе высокоэффективных и стабильных пьезоэлектрических материалов;
- 2) применение малогабаритных ПЭ в виде дисков с боковыми срезами;
- 3) использование бесклеевого (механического) крепления деталей ЧЭ с помощью тонкостенного колпачка, приваренного к пяте и основанию;
- 4) применение селективной сборки датчиков, позволяющей свести до минимума разброс основных параметров от датчика к датчику;
- 5) унификация деталей, габаритных и присоединительных размеров;
- 6) устранение влияния момента затяжки на параметры датчика за счет отсутствия резьбы на установочной части корпуса;
- 7) применение в качестве изолятора высокопрочных жаростойких керамических прокладок;
- 8) выполнение СПЭ из материала с большим КЛТР для компенсации разницы температурных деформаций корпуса и ЧЭ;
- 9) применение сварного соединения мембраны и СПЭ в датчиках малого давления для снижения нижнего значения диапазона измерений;
- 10) применение трехпроводной симметричной относительно корпуса электрической схемы датчика. В условиях эксплуатации это повышает помехозащищенность и обеспечивает возможность диагностики целостности электрических цепей без снятия с исследуемого объекта.
- 11) применение малогабаритных гермовводов для изоляции внутренней полости датчика от внешней среды;
- 12) использование специальных согласующих усилителей заряда;
- 13) применение высокоэффективных методов стабилизации отдельных узлов и датчика в целом.

- 14) внедрение статической градуировки датчиков и расчетно-экспериментального метода оценки динамических характеристик.

Разработанные специалистами НИИФИ датчики обеспечивают измерения быстропеременных давлений в диапазоне от 0,005 до 5,6 МПа на фоне медленно меняющихся давлений от 0,05 до 125 МПа в диапазоне частот от 2 до 50 000 Гц при температурах от минус 196 до 200 °С с основной погрешностью не более $\pm 4\%$ и в диапазоне частот от 40 до 50 000 Гц при температурах от минус 60 до 700 °С с основной погрешностью не более $\pm 8\%$. Дополнительные погрешности датчиков от температуры и давления не превышают $\pm 15\%$ на весь диапазон [15–17, 21].

1.2.2. Датчики акустических давлений

Датчики акустических давлений находят широкое применение в научных исследованиях, испытаниях промышленной продукции, в системах контроля и диагностики [14–16]. Поскольку акустические датчики — это датчики малых давлений, то особое внимание при проектировании этих изделий уделяется получению высокой чувствительности. В качестве ПЭ таких датчиков чаще всего используют активные или полупассивные биморфы с колебаниями изгиба и радиально или тангенциально поляризованные тонкостенные цилиндры с деформацией растяжения–сжатия. ПЭ изготавливают из высокочувствительных ПКМ на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС).

Конструкция датчика акустических давлений ДХС-514, разработанного НИИФИ на основе модулей ПМ-7-02, созданных НКТЬ «Пьезоприбор» при непосредственном участии автора, показана на рис 1.3 [14].

Датчик состоит из первичного преобразователя и согласующего устройства. Первичный преобразователь содержит корпус 11, в котором размещен блок рабочего и виброкомпенсирующего ПЭ 1, установленный на основание 10 и закрепленный с помощью опорной втулки 8 и штока 9. Блок ПЭ поджимается гайкой 4 через промежуточную шайбу 5. Кабельная перемычка 6 фиксируется втулкой 7 и с помощью сварки соединяется с корпусом 11.

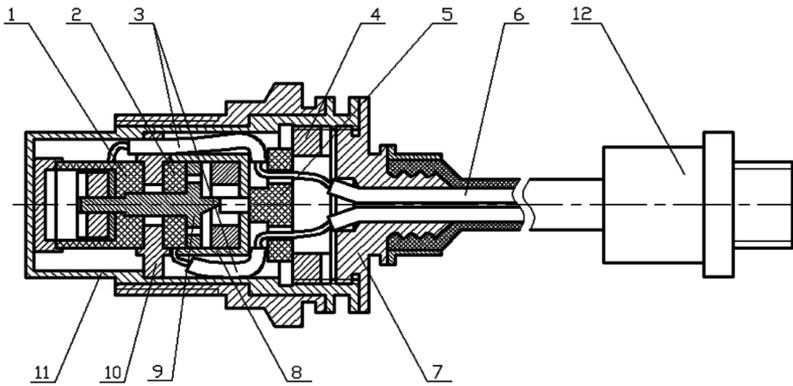


Рис. 1.3. Конструкция датчика акустических давлений ДХС-514.

Кабельная перемычка 6 заканчивается цилиндрическим корпусом 12, в котором размещено согласующее устройство. Втулка 7 и резиновый рукав защищают внутреннюю полость датчика от пыли и влаги. Датчик устанавливается на объекте с помощью резьбы М12х1 через уплотнительную прокладку. Функционально согласующее устройство состоит из усилителя заряда с устройством калибровки и масштабирующего усилителя напряжения.

Конструкция ПЭ ПМ-7 в виде тонкостенных цилиндрических модулей приведена на рис.1.4 [4, 8, 20].

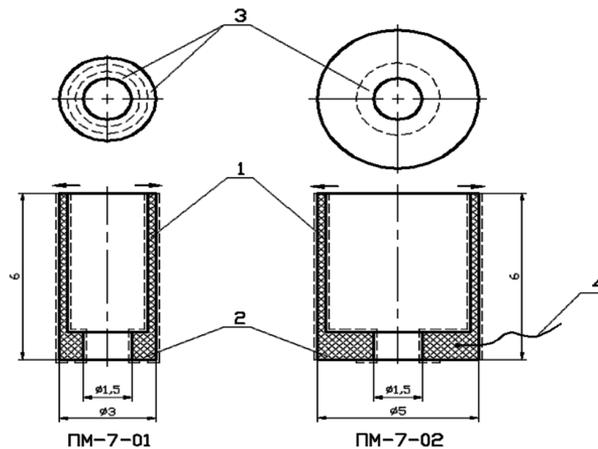


Рис. 1.4. Пьезоэлектрические модули ПМ-7

Модули ПМ-7 изготавливаются из керамики ЦТС-83Г. Модуль ПМ-7-01 выполнен в габаритах $\varnothing 3 \times 6$ мм и содержит рабочую зону 1 и основание 2. В основании имеется отверстие для закрепления модуля в датчике. Electroды нанесены на внешней и внутренней поверхностях рабочей зоны и выведены на наружную поверхность основания 3. Направление вектора остаточной поляризации ориентировано вдоль радиуса цилиндра и показано стрелкой. Модуль ПМ-7-02 имеет те же конструктивные элементы и дополнительно проволочный токосъемник 4 для облегчения подключения наружного электрода к кабелю. Габариты модуля ПМ-7-02 составляют $\varnothing 5 \times 6$ мм.

Основные характеристики датчика ДХС-514 и других датчиков акустических давлений, разработанных специалистами НИИФИ, приведены в таблице. 1.4 [16, 21].

Таблица 1.4. Основные характеристики датчиков акустических давлений

Тип датчика	Диапазон		Чувствительность, мкВ/Па	Диапазон рабочих температур, °С	Установочный размер, мм
	измеряемых давлений, дБ	рабочих частот, Гц			
ДХС 516	140–190	10–10000	5 ± 3	-196...200	M18 x 1,5
ДХС 517	125–190	3–4000	50 ± 30	-70...200	
ДХС 513	85–125	32–4000	35000 ± 3000	-10...40	M12 x 1
ДХС 514	125–180	32–10000	100 ± 30	-180...200	
ДХС 515	140–180	3–1000	10 ± 3	-100...200	M18 x 1,5
ДХС 512	134–188	32–4000	23 ± 10	0...150	M12 x 1

Разработанный ряд пьезоэлектрических датчиков серии ДХС позволяет измерять акустическое давление от 85 до 190 дБ в диапазоне частот от 3 до 10 000 Гц при температурах от минус 196 до 200 °С и избыточных давлениях до 0,3 МПа.

1.2.3. Датчики давления ведущих зарубежных фирм

Ведущие зарубежные фирмы в большинстве случаев для построения датчиков давления используют ЧЭ из монокристаллов

кварца, турмалина, метаниобата лития и др. [22–25]. ЧЭ представляет собой пакет, собранный из жестко соединенных кристаллических дисков, работающих на сжатие. Пакет устанавливается в корпус из специальной нержавеющей стали. В датчиках применяется модульное построение. Один и тот же ЧЭ может применяться с различными переходниками и корпусными деталями, отличающимися конструкцией и габаритами.

Например, фирма PCB Piezotronic JNG (США) для датчиков серии 100 разработала 6 моделей ЧЭ, на базе которых создано 25 типов датчиков. Модельный ряд этих датчиков обеспечивает измерения давления в диапазоне от 0,0007 до 8500 bar (10^5 Па) при температурах от минус 73 до 135 °С [22].

Типовая конструкция датчика давления этой фирмы показана на рис. 1.5. Датчик содержит ЧЭ, включающий 3 рабочих ПЭ 1, инерционную массу 3, виброкомпенсирующий ПЭ 4 и термоизоляционную прокладку 13, размещенные в центрирующей втулке 6 между мембраной 2 и опорой 14. Датчик содержит также согласующий усилитель напряжения 10, размещенный в полости 11. Сигнал с ПЭ через токосъемники 5 поступает на согласующий усилитель, обеспечивающий передачу информационного сигнала на значительные расстояния. На корпусе 7 имеется уплотнительное кольцо 8 для герметичной установки датчика в посадочном месте, присоединительная резьба 3/8 дюйма 9, шестигранник под ключ и миниатюрный разъем 12 [22].

Основные характеристики датчиков давления PCB

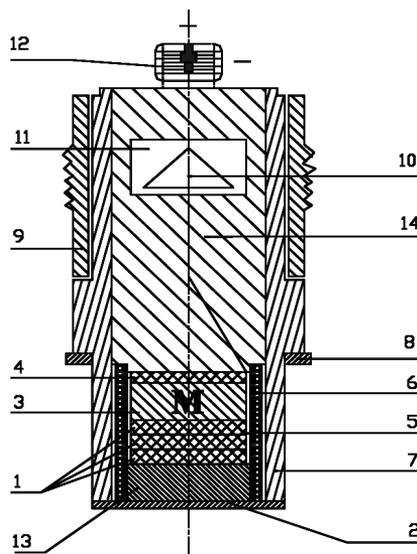


Рис. 1.5. Конструкция датчика модели 111А фирмы PCB Piezotronic JNG

Piezotronic JNG и других ведущих зарубежных фирм показаны в таблице 1.5 [22–25].

Современные пьезоэлектрические датчики давления характеризуются малыми габаритами. Диаметр мембраны, как правило, не превышает 5–7 мм, а в отдельных образцах — 1–2,5 мм. Собственная резонансная частота — от 100 до 500 кГц. Особенностью датчиков ведущих зарубежных фирм является также высокое сопротивление изоляции внутренних электрических цепей, составляющее 10^{11} – 10^{13} Ом. Благодаря этому диапазон рабочих частот составляет от долей Гц до сотен кГц и градуировка их проводится высокоточным статическим методом [23].

Нелинейность функции преобразования датчиков давления не превышает ± 1 –2%, а для образцовых датчиков $\pm 0,3\%$. Это достигается за счет применения стабильных кристаллических ПЭ, высокоточного исполнения геометрии мембраны и всех силовопередающих элементов (СПЭ). Тщательная шлифовка и доводка сопрягаемых поверхностей обеспечивает высокую жесткость конструкции и определенность динамических и частотных характеристик.

ЧЭ в датчике, как правило, удален от резьбовой части корпуса для уменьшения влияния механических напряжений, возникающих при монтаже, на показания датчика.

Одним из важнейших элементов датчика является мембрана, воспринимающая измеряемое давление и преобразующая его в силу, действующую на ПЭ. Чаще всего мембрана выполняется в виде тонкой пластины, изготовленной за одно целое с корпусом [22, 23]. Реже встречаются мембраны в виде тонкой пластины, приваренной к корпусу [24]. В первом случае легче обеспечить герметичность конструкции, во втором — однородность толщины мембраны т. к. ее можно выполнить из стальной ленты.

Для повышения линейности функции преобразования мембраны внутри или снаружи корпуса датчика делают проточку. Этой же цели служит приварка мембраны по контуру к пяте. Для повышения долговечности в условиях градиента температуры мембраны датчиков давления часто покрывают тонким слоем высокотемпературной керамики.

Таблица 1.5. Основные характеристики пьезоэлектрических датчиков давления РСВ Piezotronics JNG (США)

Тип датчика	Максимальное статическое давление [диапазон измерений], 10^5 Па (psi)	Чувствительность, [мВ/Па· 10^5]/[пКл/Па· 10^5 (pC/psi)]	Температурный диапазон, °С (°F)	Нелинейность, гистер., < ±%	Температ. погрешн., < ±%, °С ⁻¹	Виброэквивалент, кПа/(м/с ²)	Собственная частота, кГц	Масса, г	Диаметр мембраны, мм
101A	[0,00014...6,9]	[730]	-73...+135 (-100...+275)	1	0,05	0,007	250	11	5,45
101A02	[0,007...345]	[14,5]	-73...+135 (-100...+275)	1	0,054	0,0014	400	12,5	5,45
101A03	[0,014...690]	[7]	-73...+135 (-100...+275)	1	0,054	0,0014	400	12,5	5,45
101A04	[0,0014...69]	[73]	-73...+135 (-100...+275)	1	0,054	0,0014	400	12,5	5,45
101A05	[0,00014...6,9]	[730]	-73...+135 (-100...+275)	1	0,054	0,007	400	12,5	5,45
101A06	[0,0007...34]	[145]	-73...+135 (-100...+275)	1	0,054	0,0014	250	12,5	5,45
112A22	689 (10000)	15,9 (1,1)	-240...+204 (-400...+400)	1	0,1	0,0014	250	6	5,45
112A03	1034 (15000)	15,9 (1,1)	-240...+204 (-400...+400)	1	0,1	0,0014	250	6	5,45
112A05	689 (10000)	15,9 (1,1)	-240...+316 (-400...+600)	1	0,054	0,0014	250	6	5,45
112A22	[0,00007...7]	[1450]	-73...+135 (-100...+275)	1	0,1	0,0014	250	6	5,45
116B	6,9(100)	87(6)	-240...+345 (-400...+600)	1	0,072	0,014	60	20,3	6,25
118A02	3437 (50000)	1,4 (0,1)	-240...+204 (-400...+400)	2	0,18	0,035	250	12	6,25
118B01	6894 (100000)	1,6 (0,11)	-51...+204 (-60...+400)	2	0,18	0,021	250	14	6,25
118B03	8618 (125000)	1,6 (0,11)	-51...+204 (-60...+400)	2	0,18	0,031	250	14	6,25
119B	6894 (100000)	3,6 (0,25)	-184...+204 (-300...+400)	2	0,12	0,015	400	14	6,25

Продолжение таблицы 1.5. Основные характеристики пьезоэлектрических датчиков давления DUTRAN (США)

Тип датчика	Макс. давление P, bar (10 ⁵ Па)	Чувствительность, мВ/bar	Рабочий диапазон температур, °С	Нелинейность, гистерезис, > ±%,	Вибро-ускорение, g	Собственная частота, кГц	Установочные размеры, мм	Предел измерений, ΔP, bar (10 ⁵ Па)
2300V1	18	1,43	-185...+350	1	5000	250	M10x1	5
2300V3	36	1,43	-185...+350	1	5000	250	M10x1	10
2300V4	70	1,50	-185...+350	1	5000	250	M10x1	10
2300V6	700	0,43	-185...+350	2	5000	500	M12x1	15

Продолжение таблицы 1.5. Основные характеристики пьезоэлектрических датчиков давления Vibro-meter (Швейцария)

Тип	Диапазон рабочих частот, Гц	Недлинность, %	Чувствительность, рС/бар (мВ/бар)	Рабочий диапазон температур, °С	Температурная погрешность, %	Масса (г)	Динамический диапазон, бар	Резонансная частота кГц	Вибрац. чувствит. рС/g (bar/g)
CP103	2...10000	±1	232	-196...+650	-2...+5%	120+40г/м кабель	0,00004...20	>50	<0,05
CP104	2...6000	±1	190	-196...+350	-3...+5%	150	0,00005...20	>30	<0,1
CP211	2...15000	±1	25	-196...+650	-7...+13%	12+25г/м кабель	0,0005...250	>80	<0,05 (<0,002)
CP215	2...15000	±1	25	-196...+750	-4...+15%	12+25г/м кабель	0,0005...250	>80	<0,05 (<0,002)
CP216	2...15000	±1	200	-54...+470	-	12+25г/м кабель	0,0005...250	>80	<0,5 (<0,0025)
PE255	0,3...20000	<1	(17)	-253...+125	-	18 с резьбой M10x1	±100 бар пик.	>80	<0,005 (<0,005)

Продолжение таблицы 1.5. Основные характеристики пьезоэлектрических датчиков давления Kistler Instruments AG (Швейцария)

Тип датчика	Предел измерения, Па·10 ⁵	Чувствительность пКл/Па·10 ⁵	Температурный диапазон, °С	Нелинейность, гистерезис, <± %	Собственная частота, кГц	Температурная погрешн. ±10 ⁻⁴ °С ⁻¹	Виброэквивалент 10 ⁻³ bat/g	Масса, г	Диаметр мембраны, мм
6001	250	15	-196...+350	0,8	150	0,5...2	1	1,8	5,6
6005	1000	10	-196...+200	0,8	140	1	1	1,9	5,5
6013CA	250	21	-50...+350	1,0	85	0,7...2	1	20	8,6
6213BK	10000	1,2	-50...+200	0,3	150	3	10	18	10,5
6229AK	5000	2,5	-50...+200	0,5	200	2	4	12	8,5
6182B2	2000	2,5	0...<450	1,0	-	-	-	-	1,0
6043AQ12	250	20	-50...+350	0,5	70	0,7	15	36	8,0
6052C	250	20	-20...+350	0,4	160	0,5-1	0,2	30	4,4
6056A1	250	20	-20...+350	0,4	160	1	0,5	30	4,4
7013C	250	40	-50...+350	0,5	60	2	1	160	12
6189A	2000	6,9	0...<450	1,0	-	-	-	-	2,5

Снижение вибрационной чувствительности достигается путем введения в конструкцию датчика виброкомпенсирующего ПЭ из того же материала, что и рабочий ПЭ [22, 23].

Исполнение ПЭ из кристаллического кварца X-среза обеспечивает работу датчиков в диапазоне температуры от минус 200 до 260 °С. Применение кварца специального среза «Полистейбл» позволило швейцарской фирме Kistler Instrument AG повысить максимальную температуру датчиков до 350 °С. При этом изменения КП в диапазоне температур не превышает $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ или $\pm 3,5\%$ на весь диапазон [22, 23]. Для измерения давления при температурах до 650 °С используются кристаллы турмалина или кристаллический материал CV-2 [25]. Однако в тех случаях, когда согласующий усилитель установлен непосредственно в корпусе датчика, диапазон рабочих температур ограничен 150 °С.

Для измерений при более высоких температурах (до 2500 °С) применяется принудительное водяное или гелиевое охлаждение датчика. При этом монтаж на исследуемом объекте осуществляется с помощью специального адаптера, обеспечивающего подвод охладителя к датчику [22, 23].

1.3. Методы анализа пьезоэлектрических датчиков

Принцип действия пьезоэлектрических датчиков основан на уравнениях пьезоэффекта. Уравнения состояния пьезоэлектрической среды выводятся из выражений для термодинамических потенциалов, которые представляются в виде разложения в степенные ряды по соответствующим независимым переменным, определяющим внешние механические, электрические или тепловые воздействия. Если в качестве независимых переменных использовать механические напряжения σ_i , электрическое поле \mathcal{E}_m и изменение температуры ΔT , то уравнения прямого и обратного пьезоэффекта в матричной форме имеют вид [1, 4]:

$$S_i = s_{ij}^{\mathcal{E}T} \sigma_j + d_{mi}^{T\sigma} \mathcal{E}_m + \beta_i^{\mathcal{E}\sigma} \Delta T; \quad (1.1)$$

$$D_m = d_{mi}^{T\mathcal{E}} \sigma_i + \epsilon_{mk}^{\sigma T} \mathcal{E}_k + \chi_m^{\mathcal{E}\sigma} \Delta T; \quad (1.2)$$

$$\Delta\Theta = \beta_i^{\varepsilon\Gamma} \sigma_i + \chi_m^{\sigma\Gamma} \varepsilon_m + \frac{\rho c^{\varepsilon\sigma}}{T} \Delta T, \quad (1.3)$$

где σ_i — компоненты тензора механических напряжений, S_i — компоненты тензора деформации, ($i, j = 1-6$), ε_m, D_m — компоненты векторов напряженности электрического поля и индукции ($m = 1-3$), $s_{ij}^{\varepsilon\Gamma}, \varepsilon_{mk}^{\sigma\Gamma}, d_{mi}^{\varepsilon\Gamma}$ — соответственно упругие, диэлектрические и пьезоэлектрические константы, $\Delta\Theta, \Delta T$ — изменение энтропии и температуры, ρ — плотность, $c^{\varepsilon,\sigma}$ — теплоемкость, $\chi_m^{\varepsilon\sigma}$ — пирозлектрическая постоянная, $\beta_i^{\varepsilon\sigma}$ — коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР). Индексы вверху указывают соответствующие граничные условия, при которых проводятся измерения.

Соотношение (1.2) называется уравнением прямого, а (1.1) — обратного пьезоэффекта [1–4].