

ДАТЧИКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ ДЛЯ СВЕРХВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Д. И. НЕФЕДЬЕВ, Б. В. ЦЫПИН, П. Н. ЕФИМОВ

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия, e-mail: iit@pnzgu.ru

Рассмотрены основные проблемы, возникающие при разработке неохлаждаемых датчиков динамических давлений, и основные пути их решения. Приведена конструкция датчика, реализующая компенсацию погрешности из-за изменения температуры.

Ключевые слова: датчик динамического давления, чувствительный элемент, пьезоэлемент.

In this article the basic problems arising by working out of not cooled gauges of dynamic pressure have been designated. The developed ways of their decision are brought. Given sensor design, realizing compensation error of the output signal of the temperature.

Key words: dynamic pressure gauge, sensor, piezoelement.

Для множества технических объектов одним из важнейших контролируемых параметров является быстропеременное давление. В настоящее время для его контроля и измерения наиболее часто используют датчики динамического быстропеременного давления (ДБД) пьезоэлектрического типа. Они имеют эксплуатационные характеристики, определяющие надежную работу в широких динамических и частотных диапазонах, малые массогабаритные размеры, высокую надежность, не требуют источников питания.

В процессе эксплуатации ДБД подвергаются широкому спектру дестабилизирующих факторов, таких как высокие уровни квазистатического и динамического давлений, линейные ускорения, акустические шумы, механические и гидравлические удары, агрессивные и криогенные среды и т. д. Особенно стоит отметить широкий диапазон температур окружающей среды от сверхнизких

до сверхвысоких значений с импульсным переходом от -196 до $+(700...800)$ °С. Постоянное стремление к повышению надежности, упрощению конструкции и снижению массы аппаратуры, устанавливаемой на различных технических объектах, определяет применение ДБД без охлаждения. Однако при воздействии температуры окружающей среды изменяются геометрические размеры и модуль упругости материалов, что приводит к изменению чувствительности датчика и вызывает появление мультипликативной температурной погрешности δ_t . Также с увеличением температуры снижается чувствительность пьезоэлемента.

Таким образом, для устойчивой работы ДБД в указанных условиях необходимо обеспечить: постоянную передачу измеряемого параметра на чувствительный элемент (ЧЭ) датчика; механическую надежность датчика и устойчивость ЧЭ к воздействию дестабилизирующих факторов.

На рис. 1 представлена схема ЧЭ датчика.

Причинами возникновения погрешности δ_t являются изменения модулей упругости материалов пьезоэлемента $\Delta E_m/E_m$ и упругих прокладок деталей ДБД $\Delta E_n/E_n$, а также чувствительности пьезоэлектрического модуля $\Delta d_{33}/d_{33}$:

$$\delta_t = \Delta d_{33}/d_{33} + \Delta E_m/E_m - 2\Delta E_n/E_n. \quad (1)$$

Вместе с тем, датчик в простейшем случае можно представить как пьезоэлемент, зажатый между двух металлических обкладок и закрытый корпусом с мембраной, а с геометрической точки зрения – как размерную цепь (рис. 2). При этом пьезоэлемент помимо чувствительности d_{33} к температуре имеет чувстви-

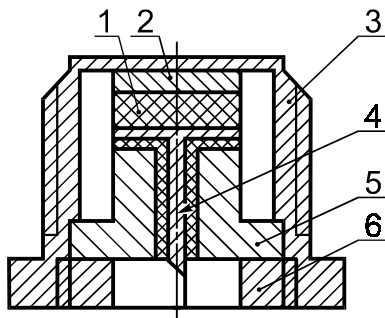


Рис. 1. Схема ЧЭ датчика:

- 1 – пьезоэлемент; 2 – пята;
3 – корпус с цельноточеной мембраной; 4 – выводной проводник; 5 – основание;
6 – ввертная втулка

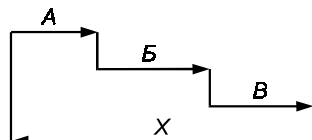


Рис. 2. Размерная цепь датчика:

- А – пята; Б – пьезоэлемент;
В – толкатель; Х – корпус

тельность к статическому давлению. Как было отмечено выше, размерная цепь зависит от температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) α и ее изменение должно удовлетворять условию

$$\Delta(A+B)+\Delta B=\Delta X.$$

Конструктивные элементы датчика выполняют, как правило, из жаропрочной стали. Элементы A , B , X – стальные, B – пьезоэлемент, при этом $\alpha_{\text{ст}} \approx 3\alpha_{\text{п}}$, где $\alpha_{\text{ст}}$, $\alpha_{\text{п}}$ – ТКЛР стали и пьезоэлемента, т.е. выполнение данного условия физически невозможно.

Таким образом, при учете изменения коэффициента d_{33} под воздействием температуры нужно вводить дополнительную погрешность $d_{33}(p)$, обусловленную влиянием давления вследствие снижения усилия поджатия, вызванного нарушением размерной цепи. С учетом этого соображения (1) примет вид

$$\delta_{\text{т}} = (\Delta d_{33}(t) + \Delta d_{33}(p)) / d_{33} + \Delta E_{\text{м}} / E_{\text{м}} - 2 \Delta E_{\text{п}} / E_{\text{п}}. \quad (2)$$

Обычно в ДБД применяют каскадное включение пьезоэлементов для повышения чувствительности, и, как следствие, $\Delta d_{33}(p)$ пропорционально увеличивается. Погрешность $\Delta d_{33}(p)$ зависит от конструктивных особенностей датчика, поэтому необходимо исключить или максимально снизить ее значение. Технологически при сборке датчиков используется поджатие пьезоэлементов с некоторым усилием, которое компенсирует изменение размеров, обусловленное изменением ТКЛР, и предотвращает потерю контакта, но при этом никак не устраняет изменение выходного сигнала.

Для устранения напряжений, возникающих вследствие расширения материалов при увеличении температуры, возможно несколько решений, связанных с применением дополнительной прокладки из материала с отрицательным ТКЛР и прокладки с малой теплоемкостью и общего теплоизолирующего слоя по контуру датчика, а также с механическим предварительным поджатием ЧЭ с заданным усилием.

Использование дополнительной прокладки из материала с отрицательным ТКЛР является простым решением, однако к таким известным в настоящее время материалам относятся только некоторые инварные сплавы с рабочим диапазоном, не превышающем 100 °С. Так, сплав, содержащий 54 % Co, 9 % Cr и 37 % Fe,

при 20 – 70 °С имеет $\alpha = -1,2 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Применение данного материала при сверхвысоких температурах невозможно, а в рабочем диапазоне – технически неоправданно. Путь данному направлению может открыть появление новых наноматериалов.

Использование прокладки с малой теплоемкостью и общего теплоизолирующего слоя по контуру датчика возможно. Однако тогда придется решать новые проблемы: передачу информационного сигнала и сохранение чувствительности пьезоэлемента. Теплоизолирующие материалы характеризуются пористой структурой и малой упругостью, которая необходима для передачи информационного сигнала. С учетом того, что коэффициент чувствительности пьезоэлектрических материалов не превышает 20 пКл/м в интервале 600 – 800 °С, при введении подобного элемента возможно значительное снижение уровня информационного сигнала на малых уровнях измеряемых давлений. Вследствие этого погрешность измерения существенно возрастает из-за влияния шумов. Применение такой схемы возможно только вблизи граничных значений рабочего диапазона, когда за счет снижения общей чувствительности датчика в допустимых пределах можно расширить этот диапазон, или же в датчиках высокого давления – сигнализаторах.

Вариант решения с применением механического воздействия на ЧЭ предполагает конструктивное исполнение датчика, обеспечивающее самокомпенсацию ухода чувствительности. Например, конструкция датчика с двойным корпусированием, разработанная в НИИФИ. При этом первый – внутренний корпус 2, 7, 8 – предназначен для сохранения стабильности чувствительности, а второй – внешний 1 – для защиты от внешних воздействующих факторов (рис. 3).

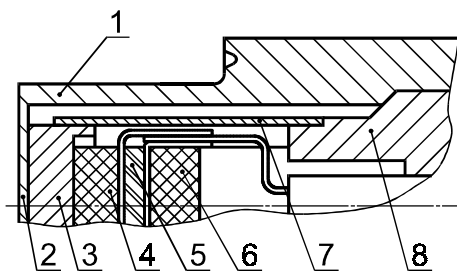


Рис. 3. Схема датчика с двойным корпусированием:

- 1 – корпус; 2 – мембрана;
3 – пята; 4, 6 – рабочий и компенсационный пьезоэлементы; 5 – прокладка; 7 – цилиндр;
8 – ввертная втулка

Внутренний корпус, выполненный из отдельных элементов, позволяет зафиксировать пьезоэлемент внутри сборки предварительным поджимом с усилием

$$M = S_{11}^E Y^E p |kl - l|,$$

где S_{11}^E – упругая податливость; Y^E – модуль упругости; p – внешнее давление; k – коэффициент, определяемый ТКЛР пьезоэлемента и прокладки; l – толщина пьезоэлемента.

Данное решение позволяет создать предварительное усилие до 10 МПа, в результате чего тонкий цилиндр 7 играет роль жесткого амортизатора, снижая деформацию под воздействием повышенных внутренних напряжений в нем, что компенсирует значение $\Delta d_{33}(p)$. Внешний корпус с тонкой мембраной обеспечивает защиту цилиндра от ударов и агрессивных сред.

Таким образом, при разработке ДБД можно рекомендовать применение компенсационных пьезоэлементов с чувствительностью к изменениям температуры как у рабочего пьезоэлемента, а также конструктивных схем, позволяющих выполнять поджим ЧЭ с усилием, превышающем $M = |\alpha l - l|$, и, как частный случай, схему двойного корпусирования.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Проектирование** датчиков для измерения механических величин / Под ред. Е. П. Осадчего. М.: Машиностроение, 1979.
2. **Богущ М. В.** Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 3. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Ростов-на-Дону: Изд-во Сев. Кав. НЦ ВШ, 2006.
3. **Шамраков А. Л.** Перспективы развития пьезоэлектрических датчиков быстропеременных, импульсных и акустических давлений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 4–8.
4. **Богущ М. В.** Оценка механической надежности чувствительных элементов пьезоэлектрический датчиков // Датчики и системы. 2008. № 3. С. 1–7.

Дата принятия 07.05.2013 г.