

# **АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОБОБЩЕННОГО ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА**

**М.В. Богуш, Е.А. Мокров, А.Е. Панич**

---

В работе с использованием обобщенного показателя качества сравниваются пьезоэлектрические датчики давления различных российских и зарубежных производителей.

В мировой практике для измерения акустического, быстропеременного и импульсного давления широко используются пьезоэлектрические датчики давления (ПДД).

Информативность ПДД характеризуется динамическим и частотным диапазонами, основной погрешностью и дополнительными погрешностями, обусловленными действием влияющих факторов [1-4]. Верхняя и нижняя границы динамического диапазона ПДД определяются соответственно прочностью или нелинейностью свойств конструктивных элементов (пьезоматериала, мембраны и др.) и шумами усилителя [4,5]. Частотный диапазон ограничен снизу постоянной времени электрических цепей, а сверху, с погрешностью 5% - одной пятой от резонансной частоты механической системы [1,4, 6].

Дополнительные погрешности ПДД в условиях эксплуатации связаны с изменением температуры, квазистатического давления, вибрации и деформацией объекта, воздействием электромагнитных полей, радиации, влиянием агрессивных сред и т.д.[1-4].

Многообразию выпускаемых ПДД ставит задачу сравнения их по некоторым обобщенным показателям качества (ОПК), что и является целью настоящей работы.

Следует отметить, что любой датчик или унифицированный ряд датчиков, как правило, создается для решения определенной инженерной задачи и должен обладать набором технических характеристик

соответствующих контролируемому процессу или объекту. И, если хотя бы один из параметров датчика, например, предельная рабочая температура или допустимые уровни вибрации или стойкость к коррозии не соответствуют предъявляемым требованиям, то изделие становится не пригодным для применения в заданных условиях, каким бы высоким ОПК оно не обладало. Тем не менее, анализ ОПК различных датчиков имеет смысл, т.к. анализировать возможные пути совершенствования средств измерения, сравнивать эффективность разработок различных авторов и фирм, достижения российских и зарубежных разработчиков, определять наиболее эффективные конструкции [3].

Систематизация ОПК различных измерительных преобразователей содержится в работе [7].

ОПК средств измерений обычно формируются на основании анализа их информационно-энергетической эффективности и объема возможностей с учетом общественно-необходимых затрат на его изготовления в следующем виде [3,8]:

$$A = \frac{V}{m} = \frac{k}{m} \prod_{i=1}^N x_i^{\alpha_i} \quad (1)$$

где  $A$  – ОПК,  $V$  – объем возможностей,  $m$  – масса датчика,  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $x_i^{\alpha_i}$  ( $i = 1, 2 \dots N$ ) – совокупность параметров, принятых во внимание при анализе,  $\alpha_i$  – весовой коэффициент каждого параметра.

В формуле (1) в зависимости от сферы применений могут учитываться любые параметры датчика, важные для анализа: чувствительность к измеряемой величине, предел измерений, собственная частота, энергетический коэффициент полезного действия, диапазон рабочих температур, основная погрешность и дополнительные погрешности от влияющих факторов и т.д. Причем, те параметры, увеличение которых

улучшает качество датчиков (чувствительность, собственная частота) будут иметь положительную степень и находится в числителе формулы (1), а те параметры, увеличение которых ухудшает качество датчика (основная и дополнительные погрешности, виброэквивалент), - будут иметь отрицательную степень и находится в знаменателе формулы (1). Абсолютные значения степеней  $\alpha_i$  в настоящее время не могут быть определены теоретически, но имеется потенциальная возможность определить их с помощью статистического анализа существующих датчиков. Коэффициент  $k$  вводится для перевода результатов расчета в универсальную единицу измерения «ранг» для сравнения технического уровня различных видов средств измерений [3].

Однако, всеобъемлющий анализ датчиков по максимальному числу показателей затруднен в силу ряда причин. Во-первых поставщики в своих каталогах и спецификациях далеко не всегда указывают полный объем интересующих нас характеристик, во-вторых, различным образом формулируются одни и те же технические характеристики: например, зарубежные фирмы, осуществляя статическую градуировку датчика переменных давлений, не указывают предела основной допускаемой погрешности ПДД, а приводят лишь ее составляющие (нелинейность, гистерезис), не указывают погрешность измерения в рабочем диапазоне частот, а приводят лишь резонансную частоту. Дополнительные погрешности при изменении температуры задаются как наиболее вероятные, а не максимально допустимые. В результате при сравнении метрологических характеристик приборов отечественных и зарубежных фирм или ОПК, в которых с тем или иным весом участвуют заявленные производителем погрешности измерений, трудно получить объективную картину.

Масса датчика, фигурирующая в знаменателе формулы (1) по мнению авторов [3] характеризует общественно-необходимые затраты на его изготовление. Возможно, это справедливо по отношению к акселерометрам, на которых проводилась практическая апробация описанного подхода.

Однако такая аналогия по отношению к датчикам давления вызывает сомнение.

Масса акселерометров во многом зависит от инерционной массы, являющейся неотъемлемой частью преобразователя вида энергии и скорее характеризует количество энергии  $E$  получаемой датчиком от объекта измерений:  $E = m \cdot a \cdot u$ , где  $a$  – ускорение,  $u$  – перемещение. По аналогии с этим объем возможностей ПДД целесообразно нормировать на площадь мембраны, которая также является одним из основных преобразователей датчика давления и от ее размеров также зависит количество энергии потребляемой на измерения:  $E = P \cdot L_{\text{эфм}} \cdot u$ , где  $P$  – давление,  $L_{\text{эфм}}$  – эффективная площадь мембраны. Однако, сведений об эффективной площади мембраны датчиков давления, также как и об инерционной массе акселерометров, в каталогах поставщиков не содержится, хотя очевидно, что она пропорциональна квадрату поперечного размера датчика.

Поэтому в настоящей работе для оценки технического уровня ПДД мы будем использовать следующий ОПК, вытекающий из формулы (1) с учетом приведенных выше комментариев:

$$B = K_p \cdot P_m \cdot f_p / d^2 \quad (2)$$

где  $B$  – ОПК,  $K_p$  – коэффициент преобразования измеряемого давления в заряд,  $P_m$  – максимальное рабочее давление,  $f_p$  – наименьшая резонансная частота,  $d$  – диаметр мембраны или поперечный размер датчика.

Очевидно, что  $K_p$  – определяет порог чувствительности датчика или минимально возможное измеряемое давление в нормальных условиях,  $P_m$  – характеризует максимально допустимое статическое или измеряемое импульсное давление,  $f_p$  – верхнюю границу рабочего диапазона частот. Очевидно, что, чем больше  $K_p$ ,  $P_m$  и  $f_p$  и меньше  $d$ , тем лучше. Отметим, что нижняя граница частотного диапазона пьезоэлектрических датчиков для средних температур ( $\pm 200^\circ\text{C}$ ) в большей степени определяется параметрами

согласующего усилителя и линии связи и поэтому в формуле (2) не учитывается.

Очевидно, что предложенный ОПК характеризует универсальные ПДД, предназначенные для широкого круга применений, приоритетными параметрами которых являются широкие динамические и частотные диапазоны при умеренных требованиях к интервалу рабочих температур и погрешности измерений.

Для оценки различных пьезоэлектрических датчиков давления по ОПК сначала были проанализированы изделия ведущих отечественных и зарубежных производителей [4, 6, 9-13] и из их номенклатуры выбраны модели с наиболее высоким показателем В, см. таблицу. Всего рассмотрено более 50 различных моделей ПДД.

Таблица

№	Предприятие	Модель	$K_p$ , пКл/Па·10 <sup>-5</sup>	$P_m$ , МПа	$f_p$ , ( $\Delta f$ ) кГц	Нел, гист. (погр.) $\pm$ , %
1	НИИФИ	ДПС010	3	125	250 (0,002...50)	(4)
2	Kistler Ins	6005	10	100	140	0,8
3	Ditran	2200V6	14,5	102	250	1
4	РСВPiezotronic	119A	3,6	689	400	2
5	НИИФИ	ДПС008	40	63	500(0,002...150)	(12)
6	Пьезоэлектрик	014М	2000	30	80	2

Продолжение таблицы

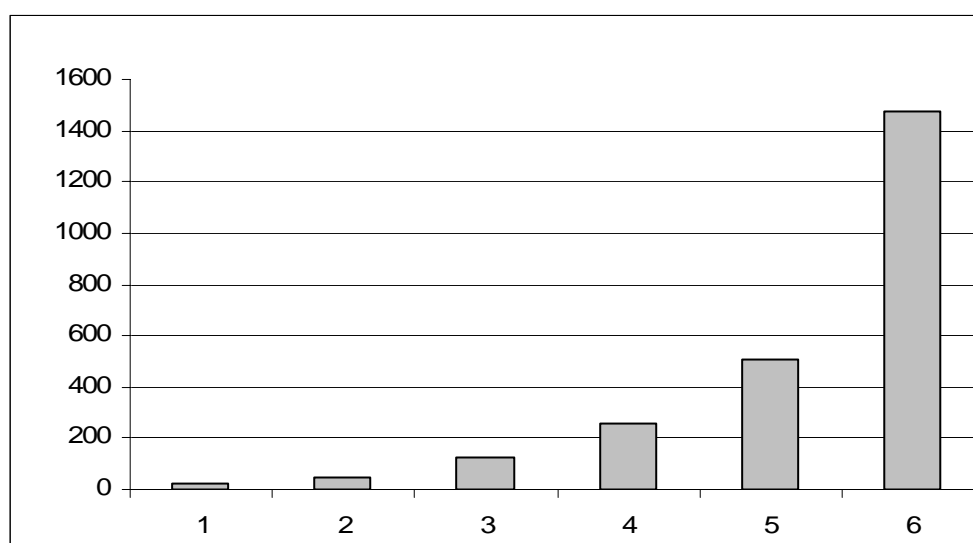
№	Предприятие	Модель	Темп, °С	Темп. погр., $\pm$ %/°С	$W_{ap}$ Па/м/с <sup>2</sup>	Масса г	d, мм	ОПК В Кл·Гц/ м <sup>2</sup>
1	НИИФИ	ДПС010	-196...200	0,08	-	20	6,0	<b>26</b>
2	Kistler Ins	6005	-196...200	0,01	10	19	5,5	<b>46</b>
3	Ditran	2200V6	-85... 260	0,02	30	7	5,4	<b>127</b>
4	РСВPiezotronic	119A	-185...204	0,007	15	14	6,25	<b>254</b>
5	НИИФИ	ДПС008	-196...150	0,08	5	0,1	5,0	<b>504</b>
6	Пьезоэлектрик	014М	-60...250	0,07	6,9	5	5,7	<b>1477</b>

В таблице указаны предприятия поставщики, модели датчиков, основные характеристики, определяющие их ОПК, а также пределы

основной допускаемой погрешности или ее составляющие, диапазоны рабочих температур и дополнительные погрешности при изменении температуры, вибрационный эквивалент  $W_{ap}$  и масса.

В числе производителей датчиков в таблице фигурируют РСВ Piezotronic JNG, DYTRAN (США), Kistler Instrument AG (Швейцария), НИИ Физических измерений г. Пенза, ООО «Пьезоэлектрик» г. Ростов-на-Дону (Россия).

Из таблицы видно, что представленные датчики характеризуются средними диапазонами рабочей температуры, имеют широкий разброс по чувствительности и максимальным рабочим давлениям, собственной частоте, массе и габаритам. В крайней справа колонке приведены значения ОПК, вариацию которого в графическом виде иллюстрирует также рисунок. На рисунке по оси X указаны номера моделей датчиков согласно таблице, а по оси Y - величина ОПК  $B$  в Кл·Гц/м<sup>2</sup>.



*Рис. Обобщенный показатель качества пьезоэлектрических датчиков давления различных производителей.*

Из таблицы и рисунка следует, что наиболее высокие ОПК имеют датчики российских производителей ДПС008 (НИИФИ) и 014М (ООО

«Пьезоэлектрик»). Подробное описание этих датчиков содержится в работах [13,14].

Сверхминиатюрные датчики ДПС008 применяются для измерения быстропеременных давлений в газах и жидкостях при аэродинамических испытаниях на лопатках турбин и на малогабаритных объектах. Датчики 014М нашли широкое применение в вихревых расходомерах газа и пара [13,14].

Датчики ДПС008 относятся к новому классу пьезоэлектрических датчиков, в которых используется объемный пьезоэффект, что открывает принципиально новые пути миниатюризации датчиков давления, т.к. для их реализации не требуется корпус и мембрана. Эти конструктивные элементы, обязательные в традиционных датчиках ввертного типа и служащие для обеспечения необходимого напряженно-деформированного состояния пьезоэлементов (ПЭ), в объемно-чувствительных датчиках не нужны. Модульные ПЭ для этих датчиков ПМ-13 разработаны НКТБ «Пьезоприбор» г. Ростов-на-Дону [15]. Малые габариты модульных ПЭ и бескорпусное исполнение обеспечивают датчику ДПС-008, не только рекордно малые массогабаритные характеристики, но и широкий динамический диапазон измерений, высокую резонансную частоту, стабильность  $K_p$  от квазистатических давлений, низкий виброэквивалент [13]. Причем, диапазоны измерений в сторону высоких давлений для этого типа датчиков практически не ограничены в силу исключительной прочности и стабильности свойств материалов при объемном сжатии.

Датчики 014М относятся также к новой разновидности пьезоэлектрических датчиков, в которых нет конструктивно выделенного элемента преобразующего измеряемое давление в деформацию ПЭ. Датчик 014М представляет собой пьезоэлектрический цилиндр, установленный в тонкую металлическую оболочку. Благодаря этому в малых габаритах достигается высокая чувствительность и прочность конструкции, высокая резонансная частота [14].

Анализ ОПК выпускаемых ПДД показывает, что, несмотря на достигнутый достаточно высокий технический уровень как отечественных, так и зарубежных пьезоэлектрических датчиков, имеются значительные резервы и заделы для дальнейшего повышения их информативности путем совершенствования конструктивных схем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Туричин А. М. электрические измерения неэлектрических величин. – М.-Л.:Энергия, 1966, с.52-61.
2. Левшина К.С., Новицкий И.В. Электрические измерения физических величин, М.: Энергоатомиздат, 1973, с. 107-130.
3. Проектирование датчиков для измерения механических величин/ Под общ. ред. Е.П. Осадчего. – М.: Машиностроение. 1979. -480 с.
4. Датчики теплофизических и механических параметров: Справочник в трех томах./ Под общ. ред. Ю.Н. Коптева; Под ред. Е.Е. Богдатьяева, А.В. Гориша, Я.В. Малкова. М.: ИПРЖР, Т.1 (кн.2) 1998 – 512 с., Т.2 1999 – 688 с.
5. Коган С.Л. Оценка помехоустойчивости низкочастотного пьезоприемника с согласующим усилителем. – В кн.: Пьезоэлектрические материалы и преобразователи.- Ростов-на-Дону, 1985, с.70-76.
6. Пьезоэлектрические датчики давления. [www.kistler.com](http://www.kistler.com). Kistler Instrument AG , 2007.
7. Мокров Е.А. Метод построения датчиков акустического давления для ракетно-космической техники. – В сб.: «Надежность и Качество 2001» Труды международного симпозиума. – Пенза, 2001, с. 152-157.
8. Король Е.И., Новицкий П.В., Шмаков Э.М. Оценка качества датчиков/ Труды ЛПИ м. Калинин. – 1975. - №342. с. 17-19.
9. Pressure Sensors. [www.pcb.com](http://www.pcb.com). PCB Piezotronic JNG, - 2007.
10. Pressure Sensors.[www.dytran.com](http://www.dytran.com). Dytran Instruments Inc. - 2007.



11. Средства измерения давления, уровня, расхода и температуры. Каталог продукции, НКТБ «Пьезоприбор» РГУ и ООО «Пьезоэлектрик», г.Ростов-на-Дону, 2005 - 69с.

12. Датчики и преобразующая аппаратура. Каталог НИИ Физических измерений.- Пенза, 2001, 157с.

13. Мокров Е.А., Бутов В.И., Политменцева Т.Н. Пьезоэлектрические датчики быстропеременных давлений нового поколения на основе перспективных пьезоэлектрических материалов.- В. сб.: Фундаментальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения, т.2 – Ростов-на-Дону, 1999, с.153-165.

14. Пьезоэлектрическое приборостроение: сборник в 3 томах. Т. 3. Богуш М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Ростов-на-Дону. Издательство СКНЦ ВШ, 2006, 346 с: ил.

15. Гориш А.В., Богуш М.В., Рогач Т.В. и др. Преобразователи для малогабаритных датчиков акустических и быстропеременных давлений – В сб.: Пьезоактивные материалы. Физика, технология, применение в приборах. Ростов-на-Дону, 1992, 67 – 71.

*Богуш Михаил Валерьевич – канд. техн. наук, директор ООО «Пьезоэлектрик» г. Ростов-на-Дону.*

Тел. (863) 299-50-80, факс 290-58-22, E-mail: [piezo@inbox.ru](mailto:piezo@inbox.ru).

*Мокров Евгений Алексеевич – доктор техн. наук, профессор, директор-гл. конструктор ФГУП НИИ «Физических измерений» г. Пенза.*

Тел. (8412) 521- 463, факс 551-499, E-mail: [niifi@sura.ru](mailto:niifi@sura.ru)

*Панич Анатолий Евгеньевич – доктор техн. наук, профессор, директор-гл. конструктор НКТБ «Пьезоприбор» Южного Федерального Университета. г. Ростов-на-Дону*

Тел. (863) 22-34-01, факс 43-48-44, E-mail: [piezo@rsu.ru](mailto:piezo@rsu.ru)

