

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МОДЕЛИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

М.В. Богуш

Описан метод оценки механической надежности ЧЭ - самого ответственного и слабого звена ПД - основанный на анализе пространственной модели напряженного состояния с учетом наиболее критичных влияющих факторов: давления, действующего на ЧЭ и изменения температуры. Предложенный метод повышает достоверность оценок надежности ПД в реальных условиях эксплуатации.

Надежность датчиков является одним из основных показателей качества. Датчики относятся к невосстанавливаемым устройствам, поэтому их надежность характеризуют вероятностью невыхода из строя за время хранения и выполнения задания. Требования к надежности датчиков исключительно высоки – 0,99 - 0,9999. Датчик должен иметь прочность и действовать дольше, чем агрегат, в котором он установлен, что необходимо для определения параметров нештатной ситуации и выработке мер их предупреждения [1,2]. С точки зрения надежности датчик рассматривают в двух аспектах: метрологическом и механическом. Под метрологической надежностью понимают не превышение реальных погрешностей нормированных значений. Под механической – вероятность неразрушения датчика в процессе выполнения задания [1-5].

Оценка механической надежности датчиков на стадии проектирования осуществляется на основании структурно-функционального анализа (СФА), исходя из предполагаемой конструкции, принципа действия и условий эксплуатации. В процессе анализа, исходя из принципа равной надежности всех элементов, производят поэлементное распределение допустимой вероятности неразрушения [1,3,4].

Для оценки вероятности неразрушения необходимо знать распределение параметров нагрузки в элементах конструкции, несущую способность каждого элемента и законы их распределения как случайных величин. Если нагрузка и несущая способность элементов распределены по нормальному закону, то вероятность неразрушения k -го элемента Y_k при действии однократного статического давления P определится через интеграл вероятности Лапласа [1,3,6]:

$$Y_k = 0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\gamma_k}^0 \exp\left(-\frac{t_k^2}{2}\right) dt_k \quad (1)$$

$$t_k = \frac{M_k - \bar{M}_k}{\delta M_k}, \quad \gamma_k = \frac{\bar{M}_k}{\delta M_k} \quad (2)$$

$$(\delta M_k)^2 = (\delta P)^2 + (\delta P_{pk})^2 \quad (3)$$

где γ_k - гауссовский уровень надежности; M_k - фактическая разность между несущей способностью и нагрузкой в k -ом элементе; \bar{M}_k - разность между математическими ожиданиями несущей способности и нагрузки; δM_k - суммарная дисперсия нагрузки и несущей способности.

Коэффициент запаса в каждом элементе определяют по формуле:

$$k_k = \frac{1}{1 - \gamma_k \vartheta_{Rk}} \quad (4)$$

ν_R – коэффициент вариации - величина, зависящая от уровня применяемой технологии, обычно для металлов принимается равной 0,15[1].

Следуя работам [3,6], можно получить алгоритмы расчета вероятности разрушения и для произвольного вида функции распределения нагрузки, в том числе и при многократном ее воздействии, а также с учетом временного фактора..

Для определения несущей способности каждого элемента применяют обычный прочностной расчет. При прочностных расчетах пьезоэлектрических датчиков (ПД) несущую способность каждого элемента оценивают, как правило, в рамках приближенных моделей напряженного состояния. Так в датчиках быстропеременных давлений мембрану рассматривают как пластину [7,8], корпус – как оболочку [1,9], а чувствительного элемента (ЧЭ) – в виде стержня [9-13].

При оценке несущей способности деталей при изменении температуры используются эти же формулы, но расчетные значения механических напряжений сравниваются с пределами прочности материалов при предельных температурах заданного интервала. При расчетах корпуса, мембраны, пяты, резьбовых соединений такой упрощенный подход дает хорошее согласие с опытными данными. Однако для расчета ЧЭ, который принципиально является неоднородным и наименее прочным звеном датчика потому, что содержит преобразователь вида энергии включающий ПЭ из кристалла или керамики, уступающий по прочности металлам, такой подход может привести к грубым ошибкам.

Целью настоящей работы является совершенствование методов оценки механической надежности ЧЭ ПД на основе пространственной модели напряженного состояния.

Рассмотрим наиболее распространенный тип ЧЭ ПД, работающий на деформации растяжения-сжатия на продольном пьезоэффекте в виде трехслойного симметричного пакета. Центральный слой пакета – керамический ПЭ, а торцевые – силопередающие элементы (СПЭ), имеющие равную толщину и выполненные из одинаковых материалов.

Напряженное состояние такого элемента при действии осевой силы и изменении температуры может быть представлено в следующем виде [14]:

$$\sigma_{zz} = P, \quad \sigma_{rz} = 0, \quad \sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = \frac{\left(|s_{13}| - \frac{\nu_1}{E_1} \right) P + (\beta_1 - \beta_*) (T - T_c)}{(s_{11} + s_{12}) + \frac{1 - \nu_1}{E_1} \cdot \frac{h_2}{2h_1}} \quad (5)$$

где σ_{zz} , σ_{rz} , σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$ – осевые, сдвиговые, радиальные и азимутальные напряжения, в ПЭ, P – давление, действующее на торец ЧЭ, T – температура ЧЭ, T_c - температура при которой проведено соединение деталей в пакет, s_{ij} , β_* – упругие модули и коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) в плоскости изотропии пьезокерамики, E_1 , ν_1 и β_1 – модуль Юнга, коэффициент Пуассона и КЛТР материала СПЭ, h_1 и h_2 – толщина СПЭ и ПЭ,

В общем случае механическая надежность ЧЭ является сложной функцией температуры. Это обусловлено как изменениями с температурой свойств материалов (пределов прочности и упругих модулей), так и тем, что действие давления и изменение температуры на напряженное состояние конструкции не является независимым.

При отсутствии информации о функции распределения влияющих факторов рекомендуется исходить из худшего случая и считать что любое их значение в заданных интервалах равновероятно [1]. Очевидно, что за расчетное значение надежности следует принимать величину, соответствующую наименьшему значению вероятности неразрушения ЧЭ при любом сочетании давления и температуры в заданных интервалах.

В дальнейшем будем предполагать, что во всем заданном интервале температур выполняются следующие условия:

- зависимости пределов механической прочности (пропорциональности) материалов от температуры не имеют минимумов;
- сопротивление разрушению каждого материала описывается одними и тем же критерием прочности;
- термоупругие механические напряжения достигают максимума на краях заданного температурного интервала, что справедливо, когда КЛТР материалов не зависит или слабо изменяется от температуры.

При выполнении этих условий максимум функции $M_k = \sigma_{\text{экр}} [\sigma_{zz}(P, T - T_c); \sigma_{\text{т}}(P, T - T_c)] - \sigma_k^0(T)$, а, следовательно, и минимум интеграла вероятностей Лапласа (1) будет при одном из следующих сочетаний влияющих факторов:

$$1) T_B, P_m; \quad 2) T_H, P_m; \quad 3) T_B, 0; \quad 4) T_H, 0 \quad (6)$$

где T_B и T_H - верхняя и нижняя границы заданного интервала температур, P_m - максимальное осевое давление на ЧЭ, $\sigma_k^0(T)$ - разрушающие механические напряжения в детали: для ПЭ – пределы прочности на растяжение или сжатие, для металлов – пределы текучести (пропорциональности). Таким образом, задача оценки механической надежности ЧЭ при действии давления и изменении температуры сводится к определению наименьшей вероятности неразрушения при указанных выше детерминированных значениях влияющих факторов. Схема расчета механической надежности ЧЭ приведена на рис. 1. При расчетах необходимо выполнить следующие процедуры:

1) Определить компоненты механических напряжений, действующих в каждом элементе. Для этого используется формула (5) или результаты численных расчетов напряженного состояния, например, методом конечных элементов [15] и табличные значения упругих и термоупругих модулей материалов.

2) Определить эквивалентные механические напряжения в каждом элементе с учетом критериев прочности, характерных для каждого типа материала.

3) Определить гауссовский уровень надежности с использованием пределов прочности или пределов пропорциональности материалов и их дисперсии и вероятность неразрушения каждого элемента на основании соотношений (1-3) и табличных значений интеграла Лапласа.



Рис. 1. Схема расчета механической надежности ЧЭ

4) Определить общую вероятность неразрушения ЧЭ или датчика в целом. В частности, если разрушение каждой детали ЧЭ может привести к выходу из строя датчика и потере информации, то механическая надежность ЧЭ Y будет равна произведению вероятностей неразрушения каждого элемента Y_k [1,3]:

$$Y = \prod_{k=1}^N Y_k \quad (7)$$

Отметим, что данные оценки надежности будут справедливы и при многократном изменении температуры и давления, если в материалах отсутствуют пластические деформации и не накапливается усталостных повреждений [1].

Для экспериментальной проверки этих положений были изготовлены макеты ЧЭ, содержащие ПЭ из керамик ЦТС-83Г или ТВ-2 диаметром 10 мм и толщиной от 0,2 до 5 мм и накладки из различных материалов $\varnothing 10 \times 0,5$ мм. Соединение деталей осуществлялось за счет сил трения. Для этого на торцы пакета с помощью пневматического пресса подавалось статическое давление различной величины.

Зажатый пакет подвергался действию температурных циклов с постепенно возрастающей амплитудой. Одновременно регистрировались температурные изменения коэффициента преобразования (КП). В промежутках между циклами статическое давление снижалось до нуля и исследовалась амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ПЭ вблизи первого резонанса радиальных колебаний f_0 . АЧХ до воздействия температуры и давления имела вид типичный для дисков, рис 2 а. Это свидетельствовало о целостности ПЭ.

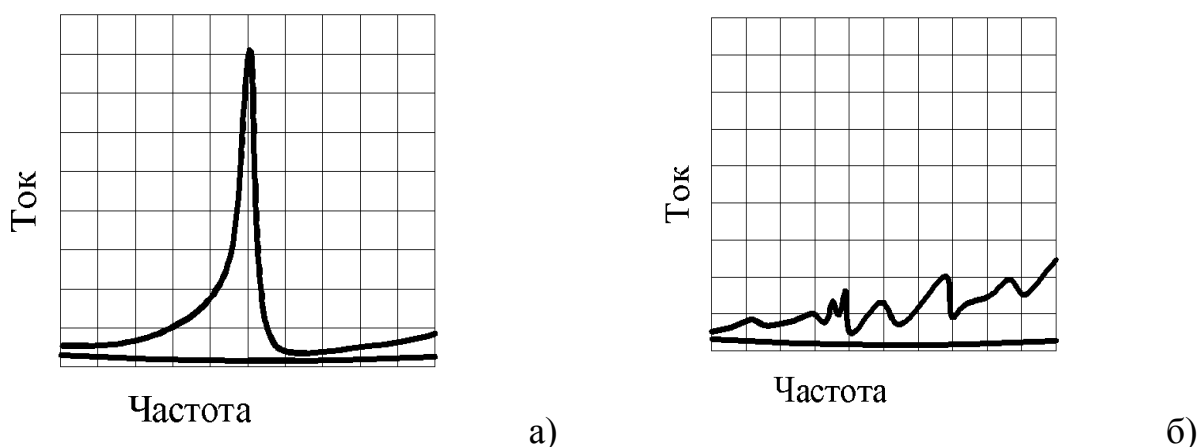


Рис. 2. АЧХ около первого резонанса радиальных колебаний целого (а) и дефектного (б) ПЭ

По мере увеличения температуры до определенного момента АЧХ оставалось неизменным. Затем резонанс расщеплялся на два или большее количество мелких пиков, рис.2 б, что свидетельствовало о появлении в ПЭ крупных дефектов. При извлечении ПЭ из держателя установки ПЭ рассыпался на 2-4 части с самой различной ориентацией трещин. Величина температуры, после которой наблюдалось искажение АЧХ, считалось предельной рабочей температурой для данного типа ЧЭ.

Для каждого типа ЧЭ проведено 2 серии опытов: в одной из них зажатие пакетов осуществлялось при температуре 20°C и в дальнейшем следовало нагревание; в другой пакеты зажимались при температурах $200 - 300^{\circ}\text{C}$ и затем охлаждались. В каждой серии испытано не менее 5 ЧЭ одного типа. В результате экспериментов были определены разрушающие интервалы температуры ΔT_p для ЧЭ с различными конструктивными и технологическими признаками. Опытные значения сопоставлялись с расчетами по нижеприведенным формулам, вытекающим из (5) [15]:

$$\sigma_{\text{п}}^{(2)} = L_{T2}(T - T_c) + L_{p2}P \leq \sigma^{\pm} \quad (8)$$

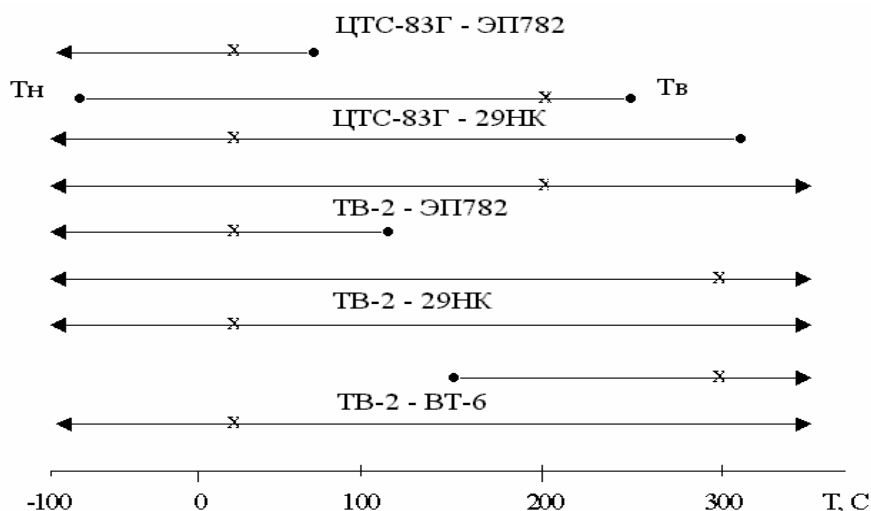
$$\Delta T_p = (T_p - T_c) = \frac{1}{L_{T2}} (\sigma^{\pm} - L_{p2}P)$$

где σ^{\pm} - пределы прочности керамики на растяжение σ^+ или сжатие σ^- , L_{T2} L_{p2} – коэффициенты пропорциональности между действующими в ПЭ механическими напряжениями и изменением температуры или величиной давления.

В таблицу 1 сведены расчетные и экспериментальные значения диапазона рабочих температур ΔT_p для испытанных ЧЭ, которые нагружались осевым давлением 50 МПа при температуре сборки T_c . На рис.3 тот же результат для расчетных значений T_p показан в графическом исполнении.

Таблица 1. Разрушающие интервалы температур для различных ЧЭ

Материалы ЧЭ	$T_c, ^\circ\text{C}$, характер изменения температуры	L_{T2} $\text{МПа}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	L_{p2}	Интервал температуры до разрушения, $^\circ\text{C}$	
				Расчет	Эксперимент
ЦТС-83Г–ЭП782	20, нагрев	0,930	0,311	47	45±14
ЦТС-83Г–ЭП782	200, охлажд.	0,930	0,311	284	>180
ЦТС-83Г–29НК	20,нагрев	0,102	0,233	304	>280
ЦТС-83Г–29НК	300,охлажд.	0,102	0,233	>500	>280
ТВ- 2 -ЭП782	20, нагрев	0,576	0,054	98	115±28
ТВ- 2- П782	300,охлажд.	0,576	0,054	>500	>280
ТВ-2 -29НК	20, нагрев	-0,321	0,003	>1000	>280
ТВ-2 -29НК	200, охлажд.	-0,321	0,003	125	150±35
ТВ-2 - ВТ-6	20, нагрев	0,008	0,063	>1000	>500



х – температура сборки T_c , • - температура разрушения при $\eta=1$
Рис. 3. Разрушающие интервалы температур для различных ЧЭ.

Отметим, что для ЧЭ, содержащих ПЭ из керамики ЦТС-83Г и СПЭ из сплава ЭП782 при $T_c = 20^\circ\text{C}$ все ЧЭ разрушились после нагрева от 20 до 70°C : механическая надежность в интервале 20..200 $^\circ\text{C}$ равна нулю. Если $T_c = 200^\circ\text{C}$, разрушений при изменении температуры от 200 до 20°C не наблюдалось. В соответствии с биномиальной схемой испытаний этот результат с достоверностью 0,7 соответствует надежности не менее 0,80 [16]. Аналогичные закономерности наблюдаются, если ЧЭ содержит ПЭ из керамики ТВ-2. Естественно, что в тех

случаях когда материалы согласованы по КЛТР, например ЦТС-83Г и 29НК или ТВ-2 и ВТ-6, то ограничений на рабочий диапазон температур по условиям прочности не наблюдается независимо от величины T_c . Результаты приведенные в таблице 1 показывают хорошее соответствие расчетных и опытных данных.

Из рис. 3 видно, что температурные напряжения во многих случаях накладывают более жесткие ограничения на допустимые рабочие температуры ЧЭ, а следовательно, и ПД на его основе, чем температура Кюри или диапазоны стабильной работы ПЭ.

Данные, приведенные в табл.1 и на рис.3 фактически отражают математическое ожидание разрушения ЧЭ при соответствующей температуре. При нормальном распределении характеристик материалов и геометрии деталей вероятность этого события не превышает 0,5. Если учесть вариацию упомянутых свойств, то можно определить интервалы рабочих температур с заданной вероятностью неразрушения или вероятность неразрушения (механическую надежность) в заданном интервале температур.

В табл. 2 приведены оценки механической надежности некоторых конструкций ЧЭ при комплексном воздействии давления и изменении температуры.

Таблица 2. Расчетные и экспериментальные оценки механической надежности ЧЭ.

Материалы ЧЭ	Типоразмер ПЭ, мм	Интервал температуры, °С	P, МПа	T _c , °С	Оценка надежности		
					Расчет по модели		Эксперимент
					Одномерной	Пространственной	
ЦТС-83Г-ЭП782	Ø10x1,0	20 - 200	50	20	>0,99	<0,1	~0
				200	>0,99	0,91	>0,80
ТВ-2-ЭП782	Ø10x1,0	20 - 300	50	20	>0,99	<0,1	~0
				300	>0,99	>0,99	>0,80
ТВ-2 – ВТ-6	Ø10x1,0	20 - 500	50	20	>0,99	>0,99	>0,80
ЦТС-83Г-ЭП782	Ø10x0,2	20 - 200	5	20	>0,99	<0,1	>0,94
			25		>0,99	<0,1	~0
			100		0,99	<0,1	~0
ЦТС-83Г - ЭП782	Ø10x1,0	20 - 200	25	20	>0,99	<0,1	0,1-0,6
			100		0,99	<0,1	~0
ЦТСБ-ЭП202	Ø4x1,0 (ПЭСД-20)	20 - 300	25	20	>0,99	<0,1	~0
ЦТСБ-29НК	Ø4x1,0 (ПЭСД-20)	20 - 300	25	20	>0,99	0,95	>0,80
ТВ-2 – ЭП-202	Ø4x1,0 (ПЭСД-21)	20 - 300	25	20	>0,99	<0,1	~0
			200		0,95	<0,1	~0
ТВ-2 - ВТ-6	Ø4x1,0 (ПЭСД-21)	20 - 300	25 200	20	>0,99 0,95	>0,99 0,95	>0,91 >0,80
ТНВ-1-ЭП-202	Ø4x1,0 (ПЭСД-22)	20 - 700	25	20	>0,99	<0,1	~0
ТНВ-1-ВТ-6	Ø4x1,0 (ПЭСД-22)	20 - 700	25 100	20	>0,99 0,99	>0,99 0,99	>0,91 >0,80

Из таблицы 2 следует, что оценки, выполненные в рамках пространственной модели, значительно лучше согласуются с экспериментом, чем расчеты в рамках одномерной модели. Это свидетельствует о том, что причиной разрушения являются планарные компоненты термоупругих напряжений, к которым одномерные модели совершенно нечувствительны.

Если оценивать механическую надежность описанных конструкций в рамках одномерной модели напряженного состояния, без учета планарных компонентов механических напряжений, то вероятность неразрушения во всех рассмотренных случаях составит 0,99 и выше, что не соответствует действительности.

В тех случаях, когда планарные термоупругие напряжения не превышают допустимые (материалы ПЭ и СПЭ согласованы по КЛТР), оценки надежности, основанные на пространственной и одномерной моделях напряженного состояния, совпадают. Однако малая разность КЛТР материалов еще не обеспечивает прочность ЧЭ. Характерными являются результаты испытаний элементов ПЭСД-22 из пьезокерамики ТНВ-1 с СПЭ из сплавов ЭП202 и ВТ-6. КЛТР материалов СПЭ, составляющие соответственно $12,1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и $8,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ в равной степени отличаются от КЛТР керамики, $10,1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Но в первом случае при $T_c = 20^\circ\text{C}$ механическая надежность конструкции в диапазоне температур $20..700^\circ\text{C}$ при давлении 25 МПа равна нулю, а во втором - близка к единице. Это объясняется тем, что накладки из ЭП202 при нагревании создают в ПЭ растягивающие механические напряжения, а накладки из ВТ-6 – сжимающие. При расчетах механической надежности в рамках предложенной модели напряженного состояния эти эффекты учитываются автоматически.

Отметим, что описанная модель напряженного состояния при малых уровнях статического давления дает заниженные оценки надежности. Это происходит из-за скольжения деталей ЧЭ относительно друг друга. В результате не выполняются условия непрерывности механических перемещений между деталями и пространственная модель не работает.

Однако, во всех случаях оценки надежности, выполненные с использованием пространственной модели напряженного состояния, не завышают фактическую надежность. Даже при отсутствии сведений об условиях контакта между деталями ЧЭ и о степени выполнения условий непрерывности, конструкция, удовлетворяющая требованиям надежности, вытекающим из пространственной модели напряженного состояния, является надежной.

Отметим, что в общем случае в датчиках как средствах измерения выделяют, по крайней мере, 3 уровня критических внешних воздействия, которые приводят к различным последствиям:

1) выход метрологических характеристик за гарантированные пределы, т. е. изменение чувствительности больше допустимого; это может быть в зависимости от ситуации и 0,5% и 10%;

2) полная потеря информации, т.е. разрушение ЧЭ;

3) разгерметизация конструкции, т.е. разрушение корпуса или уплотнения.

Конечно, появление трещин в ЧЭ вряд ли приведет к разгерметизации конструкции. Вряд ли радиальные трещины приведут к полной потере информации, т.к. статическое поджатие или внешнее давление обеспечивают сохранение формы

ЧЭ. Однако негативными последствиями этих явлений могут быть наблюдающиеся на практике в ПД и не объяснимые в рамках традиционных представлений следующие эффекты:

- изменение КП после циклического изменения температуры;
- аномально высокие изменения от температуры КП датчиков акустических давлений с колебаниями изгиба;
- повышение со временем поперечной чувствительности датчиков вибрации;
- изменение частотной характеристики.

Естественным путем исключения таких негативных эффектов является рациональный и целенаправленный выбор материалов СПЭ и температуры сборки ЧЭ.

Практика показывает, что та или иная деталь датчика может быть выполнена из различных материалов, которые одинаково обеспечивают ее основную функцию (передача упругой деформации и электрического сигнала, тепло- или электро-изоляция), но существенно отличающихся величинами КЛТР, упругих модулей, прочности [1,4]. В связи с этим имеется возможность выбора.

Критерий для выбора материалов СПЭ может быть сформулирован следующим образом: материалы должны быть таковы, чтобы оценка вероятности неразрушения ЧЭ в эксплуатационных условиях, определенная в рамках пространственной модели напряженного состояния, соответствовала заданным требованиям надежности, вытекающим из СФА надежности датчика.

Для выбора материалов СПЭ необходимо выполнить процедуры, приведенные на рис. 4.

1. Провести поэлементное распределение вероятности неразрушения ПД: выполняется путем СФА надежности датчика на основании эскиза общего вида, принципа действия и условий эксплуатации [1,3].

2. Выбрать пробный материал из числа пригодных к применению в СПЭ, и определить вероятность неразрушения конструкции в заданных условиях эксплуатации по схеме, рис. 1.

3. Сопоставить полученные значения вероятности неразрушения с установленными на основании СФА надежности датчика.

При этом возможны две ситуации: соответствует или не соответствует. В обоих случаях целесообразно повторить расчеты для других материалов, пригодных к применению в СПЭ. При этом возможна коррекция температуры сборки ЧЭ из следующих предпосылок:

- при $\beta_1 > \beta_*$ T_c должно быть $\sim T_B$ (9)
- при $\beta_1 < \beta_*$ T_c должно быть $\sim T_H$

Обозначения в (9) те же, что и в соотношениях (6-8).

При этом в ПЭ, наименее прочном звене конструкции, в рабочем диапазоне температур будут действовать преимущественно сжимающие термоупругие напряжения, сопротивление которым у керамик на порядок выше, чем растяжению.



Рис. 4. Схема выбора материалов СПЭ.

В результате расчетов определяется группа материалов, применение которых в деталях СПЭ конкретного датчика для заданных условий эксплуатации обеспечивает необходимую механическую надежность конструкции. Очевидно, что чем шире диапазоны влияющих факторов, тем меньше будет круг этих материалов, тем в меньшей степени должны отличаться их КЛТР и упругие свойства от соответствующих свойств пьезокерамики. В дальнейшем из этой группы по известным рекомендациям [1,7,10,11] может быть выбран конкретный материал с учетом его влияния на чувствительность, быстродействие, виброэквивалент ПД, а также исходя из технологичности, доступности и т.д.

Таким образом, в настоящей работе описан метод оценки механической надежности ЧЭ - самого ответственного и слабого звена ПД - основанный на анализе пространственной модели напряженного состояния с учетом наиболее критичных влияющих факторов: давления, действующего на ЧЭ и изменения температуры. Предложенный метод повышает достоверность оценок надежности ПД в реальных условиях эксплуатации и позволяет повысить их надежность в рабочих условиях за счет рационального и целенаправленного выбора материалов конструктивных элементов.

Для оценки механической надежности датчика в целом и разработке мер, способствующих повышению их надежности, перспективными являются бурно развивающиеся в настоящее время численные методы анализа пространственного напряженного состояния конструктивных элементов более универсальные относительно формы изделия [15].

ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование датчиков для измерения механических величин/ Под общ. ред. Е.П. Осадчего. – М.: Машиностроение. 1979. -480 с.
2. Датчики теплофизических и механических параметров: Справочник в трех томах/ Под общ. ред. Ю.Н. Коптева, Под ред. Е.Е. Багдатьяева, А.В.Гориша, Я.В.Малкова. – М.:ИПРЖР, Т.1, 1998 –548 с; Т.1 (кн. 2) 1999. – 512 с.
3. Осадчий Е.П. Проблемы разработки теории и инженерных методов проектирования датчиков// Приборы и системы управления, 1985, №1.– с. 16-18.
4. Карпов В.И. Оценка механической надежности элементов конструкции датчика. – Датчики систем измерения, контроля и управления.: Меж. вуз. сб. науч. тр. – Пенза: Пенз. политех. ин-т, 1981, вып.1, с. 139-143.
5. Осадчий Е.П., Карпов В.И., Подоренко Н.П. Расчетная и экспериментальная оценка механической надежности датчиков. – Приборы и системы управления, 1976, №11, с. 24-26.
6. Осяев Е.Г., Татурин Ю.А., Остапенко А.В. Оценка безопасности эксплуатации силовых конструкций.//Известия ТРТУ. Тематический выпуск: «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении».-Таганрог: Изд-во ТРТУ,2007. №3 (75), с. 105-107.
- 7.Туричин А.М. электрические измерения неэлектрических величин. – М.-Л.:Энергия, 1966, с.52-61
8. Воячек А.И., Волчихина Н.И., Основина Я.А., Толстикова А.П. Исследование и управление температурными деформациями мембранного УЭ датчиков давления. – Методы и средства измерения механических параметров в системах и управления: Тезисы докладов к Всесоюзной конференции: Пенза: 1986, с.24-25.
9. Маквецов Е.Н., Тартаковская А.М., Беликова Е.П. Постановка на ЦВМ задачи расчета деформации упругих элементов датчиков давления. – Датчики систем измерения, контроля и управления: Межвуз. Сб. научн.тр. – Пенза: Пенз. Политех.ин-т, 1982, вып.2, с.106-110.
10. Бойков Н.А. Измерение давления при быстропеременных процессах. – М.: Энергия, 1970. – 470 с.
11. Бауман Э. Измерение сил электрическими методами. – М.: Мир, 1978. – 430 с.
- 12.Александров В.К., Евдокимов В.Е., Смолко Э.М. Моделирование динамических характеристик пьезоэлектрических акселерометров. – В кн.: Виброметрия. – М.: МДНТП, 1982, с.146-149.
13. Зегжда П.Д., Макаров А.В., Молотков С.В., Смолко Л.В. Моделирование динамических характеристик пьезодатчиков с учетом нелинейности характеристик узлов–В кн.:Вибрационная техника–М.:МДНТП, 1984, с.138-141.
14. Богуш М.В. Исследование неоднородных чувствительных элементов пьезоэлектрических датчиков// Датчики и системы – 2008. - №2.
15. 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.
16. Зажиганов Л.С., Кишьян А.А. Романников Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента.- М.: Атомиздат, 1978. – 291с.

*Богуш Михаил Валерьевич – канд. техн. наук, зам. директора НКТБ
«Пьезоприбор» Южного Федерального Университета,
Тел. (863) 299-50-80, факс 290-58-22, E-mail: piezo@inbox.ru*