

АНАЛИЗ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДАТЧИКОВ ПЕРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ

Таишев С.Р.

аспирант,

Пензенский государственный университет,

Пенза, Россия

Аннотация: В статье представлен анализ метрологической модели датчика переменных процессов, построенной в математическом виде и основанной на структурной функциональной и математической функциональной моделях датчика. Рассмотрены вопросы, касающиеся метрологических характеристик пьезоэлемента, вывод функции преобразования пьезоэлемента, определения структуры образования погрешности, определение составляющих систематической погрешности от влияющих факторов. Разработанная метрологическая модель является важным этапом разработки и исследований как самих датчиков, так и информационно-измерительных систем на их основе, позволяя обеспечить информационно-энергетическую и физическую совместимость последних. Метрологическая модель позволяет установить связи между погрешностями датчика в целом и погрешностями его отдельных звеньев, обеспечивая информационно-энергетическую и физическую совместимость между ними.

Ключевые слова: датчик переменных процессов, пьезоэлемент, метрологическая модель, погрешность.

ANALYSIS OF THE METROLOGICAL MODEL OF THE SENSORS VARIABLE PROCESSES BASED ON PIEZOELECTRIC CERAMICS

Taishev S. R.

Postgraduate student

Abstract: The article presents an analysis of the metrological model of the sensor of variable processes, built in mathematical form and based on the structural functional and mathematical functional models of the sensor. The questions concerning the metrological characteristics of the piezoelectric element, the conclusion of the piezoelectric element conversion function, determining the structure of error formation, determining the components of the systematic error from the influencing factors are considered. The developed metrological model is an important stage in the development and research of both sensors and information-measuring systems based on them, allowing to provide information and energy and physical compatibility of the latter. The metrological model allows to establish connections between errors of the sensor as a whole and errors of its separate links, providing information and energy and physical compatibility between them.

Keywords: sensor variables, processes, piezoelectric element, measurement model, an error.

Датчики переменных процессов (ДПП) используются при измерении значений переменных нагрузок, воздействующих на различные изделия в процессе их эксплуатации [1, 2]. Один из основных параметров, подлежащий измерению при переменных процессах – динамическое давление. Его измерение осуществляется датчиками на основе пьезокерамики. Это обусловлено тем, что пьезоэлектрический метод преобразования позволяет при заданных минимальных размерах пьезоэлементов (ПЭ) проектировать датчики с высокой надёжностью работы, точностью и устойчивостью к внешним факторам [3-5].

Одновременно, применение средств моделирования на ранних этапах проектирования ДПП и ПЭ позволяет заранее оценить работу различных

Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМИ ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

конструктивных решений, провести анализ полученных результатов, дать предварительную оценку работоспособности конструкции, оценить влияние различных воздействующих факторов. В связи с этим является актуальным вопрос построение метрологической модели ДПП на основе ПЭ из пьезокерамики.

Метрологическая модель ДПП строится в математическом виде, на основе математической и функциональной структурных моделях датчика. Данная модель устанавливает связи между погрешностями всего датчика и погрешностями его составных частей [5, 8].

Метрологические характеристики воспринимающего элемента

Воспринимающий элемент (ВЭ) ДПП (в большинстве случаев, стальная мембрана) в качестве измерительного преобразователя можно представить в виде структурной схемы, изображенной на рисунке 1.

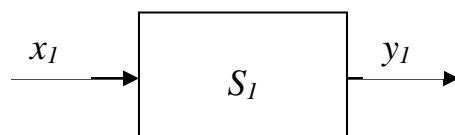


Рис. 1 – Структурная схема ВЭ

Преобразуемая величина x_I воздействует на ВЭ, и на его выходе образуется величина y_I как функция преобразования (ФП):

$$y_I = S_I \cdot x_I, (1)$$

где S_I – чувствительность ВЭ.

Учитывая, что закон Гука является основополагающим для реализации данного преобразования, то ФП принимается линейной, так как чувствительность ВЭ не зависит от величины на входе. Соответственно, ВЭ будет характеризоваться номинальной величиной на входе $x_{ном}$ и соответствующей ей номинальной величиной на выходе $y_{ном}$. Таким образом, исходя из определения ФП, чувствительность ВЭ можно представить в виде:

$$S_I = \frac{y_{ном}}{x_{ном}}. (2)$$

Корреляция между величинами на входе и на выходе обеспечивается постоянством чувствительности ВЭ. При $S_I = const$, случайному значению величины на входе x_i соответствует случайное значение величины на выходе y_i . При этом условии ВЭ не имеет погрешности. Однако данное условие никогда не обеспечивается на практике. На чувствительность ВЭ оказывают влияние различные факторы: температура, электромагнитные поля, механические воздействия, старение и т.д. [6, 7].

Чувствительность ВЭ также зависит от измеряемой величины. Например, при действии силы на ВЭ его чувствительность уменьшается, так как увеличивается жесткость ВЭ. Это обуславливает возникновение погрешности от нелинейности Δ_n . Причинами нелинейности также могут быть упругие свойства материала ВЭ и неоднозначное восприятие величины на входе при ее изменении. Последние приводят к возникновению другой погрешности – погрешности от гистерезиса Δ_f (вариация показаний). Данная погрешность характеризуется тем, что при изменении величины на входе x_i , значения величины на выходе y_i не совпадают [9, 10].

Воздействие линейных ускорений приводит к тому, что ВЭ деформируется за счет сил инерции, что обуславливает появление погрешности от воздействия линейных ускорений Δ_d . По сути, она является аддитивной погрешностью, сдвигая ФП параллельно самой себе на величину Δ_d .

Воздействие на ВЭ вместе с линейными ускорениями вибрационных нагрузок приводит к возникновению погрешности от воздействия вибраций Δ_f , которая также является аддитивной.

Влияние на ВЭ времени обуславливает изменение свойств материала, из которого он изготовлен. В материале ВЭ со временем происходят определенные процессы, которые формируют фазовые переходы, изменяя

модуль упругости и геометрические размеры, что приводит к сдвигу ФП (изменению начального уровня). Изменения ФП, обусловленные действием данного фактора, характеризуются временной погрешностью Δ_v .

Температура оказывает наибольшее влияние на чувствительность ВЭ. При изменении температуры изменяются как геометрические размеры ВЭ, так и модуль упругости материала, что вызывает изменение чувствительности ВЭ. Обычно с увеличением температуры увеличивается чувствительность ВЭ, то есть увеличивается наклон прямой, представляющей ФП. Изменение чувствительности за счет изменения температуры называется мультипликативной температурной погрешностью Δ_s [7, 10].

Изменение ФП (нуля и чувствительности) также обуславливается воздействием влажности, радиации, атмосферного давления и т. д.

Действие всех вышеперечисленных факторов является причиной соответствующей погрешности, из-за чего ФП может принимать любое значение, определяющее точностные свойства ВЭ.

Определение погрешностей ВЭ

Общий вид ФП ВЭ может быть представлен как:

$$y_I = S_I(x, x_1, x_2, \dots, x_n) x + b(x, x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (3)$$

где $S_I(x, x_1, x_2, \dots, x_n)$ – коэффициент преобразования ВЭ, который по сути является функцией измеряемой величины x и совокупности влияющих величин $x_1 \dots x_n$;

$b(x, x_1, x_2, \dots, x_n)$ – начальное значение сигнала на выходе (при $x = 0$), который по сути является также функцией величин x, x_1, x_2, \dots, x_n .

Иначе уравнение (3) можно записать в виде:

$$y_I = S_I \cdot x + b, \quad (4)$$

с учетом того, что S_I и b – это сложные функции многих аргументов.

В случае существования исключительно аддитивной составляющей погрешности ФП ВЭ имеет вид:

$$y_I = S_I \cdot (x + \Delta_0), \quad (5),$$

где Δ_0 – абсолютная погрешность нулевого уровня (аддитивная абсолютная погрешность).

В случае существования исключительно мультипликативной составляющей погрешности ФП ВЭ имеет вид:

$$y_I = S_I \cdot (1 + \delta_I) x, \quad (6),$$

где δ_I – относительная погрешность чувствительности (относительная мультипликативная погрешность).

В конкретных случаях может доминировать одна из этих составляющих погрешности, в этом случае другой составляющей можно пренебречь.

Исходя из условий эксплуатации ДПП, практически всегда существуют как аддитивная, так и мультипликативная составляющие погрешности.

Тогда ФП ВЭ записывается в виде:

$$y_I = S_I \cdot (1 + \delta_I) \cdot (x + \Delta_0). \quad (7)$$

Будем считать, что влияющие величины являются независимыми и определим абсолютную систематическую погрешность как полный дифференциал сложной линейной функции вида (3). В этом случае:

$$dy_I = x \sum_{i=1}^n \frac{\partial S_I}{\partial x_i} dx_i + \sum_{i=1}^n \frac{\partial b}{\partial x_i} dx_i. \quad (8)$$

Разделив (8) на y_I , получим величину относительной систематической погрешности:

$$\gamma_y = \frac{dy_I}{y_I} = \frac{x}{y_I} \sum_{i=1}^n \frac{\partial S_I}{\partial x_i} dx_i + \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_I} \frac{\partial b}{\partial x_i} dx_i, \quad (9)$$

где S_I – коэффициент преобразования ВЭ.

В выражении (9) величина

$$\frac{x}{y_I} \frac{\partial S_I}{\partial x_i} = \frac{\partial S_I / S_I}{\partial x_i}, \quad (10)$$

определяет относительное изменение коэффициента преобразования, обусловленное изменением влияющего фактора x_i . Эту величина называется

относительной мультипликативной чувствительностью ВЭ к влияющему фактору x_i и обозначается S_{ki} .

Введем величину

$$\frac{1}{y_{np}} \frac{\partial b}{\partial x_i}, \quad (11)$$

где y_{np} – значение сигнала на выходе, которое соответствует пределу измерения ВЭ.

Эта величина характеризует вызванное изменением влияющего фактора x_i относительное изменение начального уровня сигнала на выходе ВЭ и называется относительной аддитивной чувствительностью ВЭ к влияющему фактору x_i .

С использованием введенных обозначений перейдем в выражении (9) к конечным приращениям и получим:

$$\gamma_y = \sum_{i=1}^n S_{ki} \Delta x_i + (y_{np} / y) \sum_{i=1}^n S_{bi} \Delta x_i. \quad (12)$$

Для анализа систематических погрешностей необходима информация по:

- выражению для ФП ВЭ;
- перечню влияющих факторов и параметрам законов их изменения;
- зависимостям аргументов, входящих в ФП, от влияющих факторов.

Чувствительность ВЭ по деформации определяется как:

$$S_l = \frac{B_M}{E \cdot h^2}, \quad (13)$$

где B_M - коэффициент чувствительности ВЭ в зависимости от его конструкции;

h - толщина ВЭ;

E - модуль упругости материала ВЭ.

Толщина ВЭ находится как:

$$s' = 2 \pi \cdot R \cdot h, \quad (14),$$

где R - радиус ВЭ.

Откуда:

$$h = \frac{s'}{2\pi \cdot R}. \quad (15)$$

Тогда зависимость для коэффициента преобразования (чувствительности по деформации) ВЭ будет иметь вид:

$$S_I = \frac{B_M}{E \cdot \frac{s'^2}{4\pi^2 \cdot R^2}} = \frac{4\pi^2 \cdot R^2 \cdot B_M}{E \cdot s'^2}. \quad (16)$$

Как уже говорилось, температура оказывает максимальное влияние на чувствительность ВЭ. При температурных изменениях варьируются геометрические размеры ВЭ и модуль упругости материала, вызывающие изменение чувствительности ВЭ.

Построим модель образования погрешности в случае только одного фактора влияния – температуры.

В этом случае формула (12) запишется как:

$$\gamma_{yt} = S_{kt} \Delta T + S_{bt} \Delta T \cdot y_{np} / y, \quad (17)$$

где S_{kt} – температурная относительная мультипликативная чувствительность ВЭ;

S_{bt} – температурная относительная аддитивная чувствительность ВЭ;

ΔT – изменение температуры.

Относительная мультипликативная чувствительность S_{kt} определяется как производная сложной функции, так как различные сомножители коэффициента преобразования ВЭ являются функциями температуры:

$$S_{kt} = \frac{1}{S_I} \frac{\partial (4\pi^2 \cdot R^2 \cdot B_M / E \cdot s'^2)}{\partial t} = \frac{1}{S_I} \left(-\frac{1}{E} \frac{\partial E}{\partial t} - \frac{2}{s'} \frac{\partial s'}{\partial t} \right) \frac{4\pi^2 \cdot R^2 \cdot B_M}{E \cdot s'^2}. \quad (18)$$

Для линейных зависимостей $E = f_1(T)$ и $s' = f_2(T)$ величина $dE/dt = \alpha_E$ определяет изменение модуля упругости, приходящееся на один градус, величина $ds'/dt = \alpha_s$ – изменение площади поперечного сечения ВЭ, также

приходящееся на один градус. Коэффициенты α_E и α_s для соответствующих материалов являются справочными значениями.

С учетом введенных обозначений величину S_{kt} можно записать как:

$$S_{kt} = -\frac{\alpha_E}{E} - 2\frac{\alpha_s}{s'}. \quad (19)$$

В полученном выражении $\alpha_E = dE/dt$ и $\alpha_s = ds'/dt$ есть ни что иное, как составляющие мультипликативной температурной погрешности ВЭ.

Таким образом, относительная мультипликативная температурная погрешность ВЭ определяется алгебраической суммой относительных значений температурных коэффициентов термозависимых сомножителей функции преобразования:

$$\delta_I = -\alpha_E - 2\alpha_s. \quad (20).$$

Вывод функции преобразования ПЭ

В ДПП передача механических усилий на ПЭ происходит через некоторые промежуточные элементы, фактически являющиеся металлическими шайбами – силопередающей и изоляционной. При этом упругие свойства материалов ПЭ и шайб существенно отличаются друг от друга, изменяя генерируемый ПЭ сигнал из-за действия внешней силы. Для определения чувствительности ПЭ необходимо количественно оценить вклад упругого взаимодействия на поверхности ПЭ с шайбами.

Рассмотрим пьезоэлектрический элемент в виде цилиндра постоянной толщины $2h$ и радиусом a с шайбами толщиной H , расположенными на торцах. Поместим в центр этой системы систему координат $\{r, \theta, z\}$ с осью oz , параллельной образующей системы (рисунок 2).

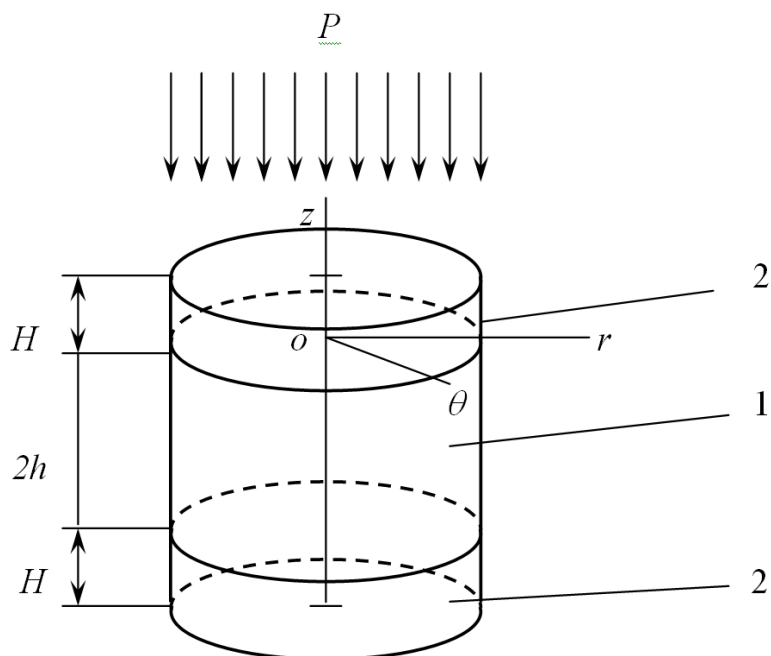


Рис. 2 – Пакет, содержащий ПЭ 1, размещенный между двумя шайбами 2

Считаем, что шайбы изотропны и однородны, а ПЭ выполнен из керамического материала с осью поляризации, направленной вдоль оси oz . На торцах ПЭ сформированы сплошные металлические электроды малой толщины, которые закорочены. Считаем также, что коэффициент трения между пьезоэлементом и шайбами равен бесконечности. На торцевые поверхности шайб воздействует равномерно распределенная гармоническая сила $P = P_0 e^{j\omega t}$, а на боковой поверхности упругой системы равнодействующая всех сил равна нулю.

Краевые условия и условия непрерывности на границе ПЭ-шайба имеют вид:

$$\text{при } z = \pm(H, h) \quad \sigma_{zz}^{(2)} = P, \quad \sigma_{rz}^{(2)} = 0, \quad \varphi = 0;$$

$$\text{при } r = \pm a \quad \sigma_{\theta\theta}^{(2)} = \sigma_{\theta\theta}^{(1)} \quad \sigma_{\theta r}^{(2)} = \sigma_{\theta r}^{(1)} \quad \sigma_{r\theta}^{(2)} = \sigma_{r\theta}^{(1)} \quad \sigma_{rz}^{(2)} = \sigma_{rz}^{(1)}; (21)$$

$$\text{при } r = a \quad \sigma_{rz}^{(i)} = \sigma_{rr}^{(i)} = D_r = 0, \quad (i=1, 2),$$

где $\sigma_{km}^{(i)}$ – компоненты механических напряжений в i -м слое;

u (u_z, u_r) – вектор механических смещений;

φ – электрический потенциал;

$D (D_z, D_r)$ – электрическая индукция;

P – внешняя сила P , отнесенная к единице площади.

Решение данной краевой задачи, удовлетворяющее уравнениям электроупругости, строится с помощью разложения решения по малому параметру $\varepsilon = h/a$ в виде:

$$u^{(i)} = u_0^{(i)} + \varepsilon^2 u_2^{(i)} + \dots \varphi = \varphi_0 + \varepsilon^2 \varphi_2 + \dots (22)$$

Получим выражения для напряженно-деформированного состояния ПЭ, удовлетворяя уравнениям равновесия и электростатики, крайевым условиям и ограничиваясь членами с ε^2 ;

$$\sigma_{zz} = P \quad \varphi=0 \quad u_r = -rP \frac{\frac{v_n}{1-v_n}H + \frac{C_{13}}{C_{33}}h}{\frac{E_n}{1-v_n}H + \frac{C_{13}}{C_{33}}\frac{h}{|S_{13}|}}; (23)$$

$$u_r = \frac{P}{C_{33}} + 2 \frac{C_{13}}{C_{33}} P \frac{\frac{v_n}{1-v_n}H + \frac{C_{13}}{C_{33}}h}{\frac{E_n}{1-v_n}H + \frac{C_{13}}{C_{33}}\frac{h}{|S_{13}|}}; (24)$$

$$\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} = -2P \frac{\frac{v_n}{1-v_n}H + \frac{C_{13}}{C_{33}}h}{\frac{C_{33}}{C_{13}}|S_{13}|\frac{E_n}{1-v_n}H + h} + 2 \frac{C_{13}}{C_{33}} P, (25)$$

где C_{ij} – упругие модули керамики;

S_{ij} – упругие податливости керамики.

Вычисляя интеграл по поверхности ПЭ при $z = \pm h$

$$\iint [d_{33}\sigma_{zz} + d_{31}(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta})] r dr d\theta = Q, (26)$$

окончательно получим аналитическое выражение для чувствительности ПЭ:

$$\frac{Q}{P} = d_{33} + 2|d_{31}| \frac{E_k v_n - E_n v_k}{E_k(1-v_n)\frac{h}{H} + \frac{C_{33}}{C_{31}}v_k E_n}, (27)$$

где d_{33} , d_{31} – пьезомодули;

E_k, ν_k, E_n, ν_n – соответственно модули Юнга и коэффициенты Пуассона материалов ПЭ и шайб.

Таким образом, коэффициент преобразования S_2 (чувствительность) ПЭ равен:

$$S_2 = d_{33} + 2|d_{31}| \frac{E_k \nu_n - E_n \nu_k}{E_k (1 - \nu_n) \frac{h}{H} + \frac{C_{33}}{C_{13}} \nu_k E_n}. \quad (28)$$

Вывод модели погрешности измерительного модуля как составляющего ДПП

Определение структуры образования погрешности проведем с использованием метода логарифмического дифференцирования, заключающийся в логарифмировании функции и последующем ее дифференцировании:

$$\lg Q = \lg d_{33} + \lg E_k - 2 \lg E_n + 2 \lg \nu_n - 2 \lg \nu_k - \lg C_{33} + \lg C_{13}, \quad (29)$$

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{dd_{33}}{d_{33}} + \frac{dE_k}{E_k} - 2 \frac{dE_n}{E_n} + 2 \frac{d\nu_n}{\nu_n} - 2 \frac{d\nu_k}{\nu_k} - \frac{dC_{33}}{C_{33}} + \frac{dC_{13}}{C_{13}}. \quad (30)$$

Заменяя дифференциалы конечными приращениями, получим формулу образования систематической погрешности измерительного модуля:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta d_{33}}{d_{33}} + \frac{\Delta E_k}{E_k} - 2 \frac{\Delta E_n}{E_n} + 2 \frac{\Delta \nu_n}{\nu_n} - 2 \frac{\Delta \nu_k}{\nu_k} - \frac{\Delta C_{33}}{C_{33}} + \frac{\Delta C_{13}}{C_{13}}. \quad (31)$$

Действительно, $\Delta Q/Q$ является относительным изменением сигнала на выходе ПЭ под действием того или иного аргумента, входящего в ФП. В выражении (31) все слагаемые входят в общую сумму со своими знаками и отражают накопление (или компенсацию) суммарной погрешности измерительного модуля.

При необходимости вывода отдельных составляющих систематической погрешности измерительного модуля от воздействия влияющих факторов проводится анализ поведения всех компонентов (31) в зависимости от условий эксплуатации. Наибольшее влияние на ДПП оказывает температура. В этом

случае температурная погрешность измерительного модуля будет обусловлена изменением модули упругости материала модуля $\Delta E_k/E_k$, материала шайб $\Delta E_n/E_n$ и пьезоэлектрических коэффициентов $\Delta d_{33}/d_{33}$.

Соответственно, мультипликативная температурная погрешность определится выражением:

$$\delta_2 = \frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta d_{33}}{d_{33}} + \frac{\Delta E_k}{E_k} - 2 \frac{\Delta E_n}{E_n} = \alpha_d + \alpha_{E_k} - 2\alpha_{E_n}. \quad (32)$$

Так как все остальные слагаемые погрешности, входящие в выражение (30), от температуры не зависят, то они обращаются в нуль.

Таким образом абсолютная погрешность ФП ДПП, приведенная к выходу, будет определяться как:

$$y_p - y = x \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot (\delta_1 + \delta_2) = \\ = x \cdot \pi \cdot \left(\frac{R+r}{2} \right)^2 \cdot \left(d_{33} + 2|d_{31}| \frac{E_k \nu_n - E_n \nu_k}{E_k (1 - \nu_n) \frac{h}{H} + \frac{C_{33}}{C_{13}} \nu_k E_n} \right) \cdot (\delta_1 + \delta_2), \quad (33)$$

Относительная погрешность ФП ДПП будет определяется выражением:

$$\gamma_y = \frac{y_p - y}{y} \cdot 100\% = \frac{x \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot (\delta_1 + \delta_2)}{x \cdot S_1 \cdot S_2} \cdot 100\% = (\delta_1 + \delta_2) \cdot 100\%. \quad (34)$$

Как видно из полученного выражения, относительная погрешность ФП ДПП определяется алгебраической суммой мультипликативных температурных погрешностей измерительных преобразователей, входящих в состав датчика.

Разработанная метрологическая модель является важным этапом разработки и исследований как самих датчиков, так и информационно-измерительных систем на их основе, позволяя обеспечить информационно-энергетическую и физическую совместимость последних. Кроме того, на этапе моделирования закладываются и проверяются прочностные, метрологические параметры и характеристики надежности ДПП.

Библиографический список

1 Taymanov R. and Sapozhnikova K. Intelligent measuring instruments. Maximum reliability of measuring information, minimum metrological maintenance // Proceedings of XVII IMEKO World Congress. Dubrovnik, Croatia, 2003, P. 1094 - 1097.

2 Тайманов Р.Е., Сапожникова К.В. Интеллектуализация встроенных средств контроля как способ повышения надежности оборудования // Проблемы машиноведения. Точность, трение и износ, надежность, перспективные технологии, под общей редакцией В.П.Булатова.-С.-Пб.: Наука, 2005 г., С. 421-469.

3 Taymanov R., Sapozhnikova K. Metrological self-check and evolution of metrology // Measurement. Vol.43, 2010, № 7, С. 869 -877.

4 Henry M. P. and Clarke D. W. The self-validating sensor: rationale, definitions and examples // Control Engineering Practice. Vol. 1. 1993, № 4, P. 585-610.

5 Barberree D. Dynamically self-validating contact temperature sensors // Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry. AIP Conference Proceedings. Ripple D. C. et al (Eds.). New York, Melville, Vol 7, 2003, P. 1097-2001.

6 Е.А. Мокров, И.Н. Баринов, П.Н. Цибизов. Полупроводниковые пьезочувствительные элементы микроэлектронных датчиков давлений // Основы проектирования и разработки: учеб. пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2009.–104 с.

7 Баринов И.Н., Волков В.С. Повышение долговременной стабильности высокотемпературных полупроводниковых датчиков давлений // Приборы.– 2010.–№3.–С. 9-15.

8 ГОСТ 8.009-84 Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. М., 2003, 27 с. (Государственная система обеспечения единства измерений).

9 Хахо И.Х. Динамическая коррекция сейсмических сигналов в задаче анализа качества и надежности электрооборудования // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 313. № 5. С. 138 -143.

10 Янчич В.В., Иванов А.А., Орехов В.С. и др. Способы проверки и калибровки пьезоэлектрических акселерометров с изгибными элементами // Труды VI международной научно-технической конференции «Инновационные процессы пьезоэлектрического приборостроения и нанотехнологий». - Ростов-на-Дону, изд-во Ростовского государственного педагогического университета, 2008. С. 176-179.

Оригинальность 74%