

# ИНФОРМАЦИОННЫЙ КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

**Балыков А.В., Ларионов М.Ю., Седалищев В.Н., Тицнер А.О.**

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова  
г. Барнаул

Процесс получения измерительной информации является случайным процессом. Поэтому применяя математический аппарат теории вероятности, и используя энтропийный подход к понятию информации, можно произвести оценку информативности измерительного устройства (рисунок 1).

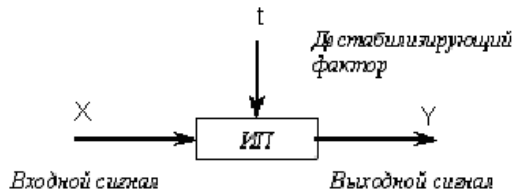


Рисунок 1 – Функциональная схема измерительного преобразователя.

Количество информации ( $I$ ), полученной в результате измерительного процесса, который может быть представлен функцией  $y = \varphi(x, t)$ , определяется известной формулой:

$$(I = H_1 - H_2), \quad (1)$$

где ( $H_1$ ) и ( $H_2$ ) - соответственно, априорные и апостериорные значения энтропии.

Для того чтобы оперировать с безразмерными величинами перейдем к нормированным значениям измеряемой величины ( $x$ ) и влияющего фактора ( $t$ ). Приращение нормированной дифференциальной энтропии для данного случая можно определить, используя понятие якобиана ( $J$ ) случайной функции  $y = \varphi(x, t)$  [1]:

$$\Delta H \approx J \left( \frac{y}{x} \right) \approx \log \frac{\partial y / y}{\partial x / x} = \log \frac{\partial y / \partial x}{y / x} = \log \frac{S_f}{S_E}, \quad (2)$$

$$\hat{E}_i = \frac{S_f}{S_E} = \frac{tg \alpha}{tg \beta}, \quad (3)$$

$$\Delta I \approx \log \left( \frac{\partial y / y}{\partial x / x} \right) \approx \log \hat{E}_i, \quad (4)$$

где  $H_1, H_2$  - априорное и апостериорное значения энтропии измерительного процесса;  $S_L, S_N$  - линейный и нелинейный коэффициенты чувствительности;  $\hat{E}_i$  - коэффициент нелинейности функции измерительного преобразования.

Коэффициент нелинейности функции измерительного преобразования ( $\hat{E}_i$ ) является одновременно и коэффициентом относительной чувствительности измерительного устройства. Из данной формулы следует, что при повышении чувствительности измерительного устройства возрастает и его информационная способность. Но если при этом будет повышаться чувствительность устройства также и к дестабилизирующим факторам, то информативность такого измерительного устройства не возрастет.

В то же время, точность измерения и информативность процесса измерительного преобразования определяется соотношением уровней полезного сигнала и сопутствующих ему помех [2]:

$$I = \log \frac{x}{2\Delta x} \cdot \frac{K_t}{K_x},$$

$$I = \log \frac{x}{2\Delta x} \cdot \hat{E}_{\varphi\phi}, K_{\varphi\phi} = \frac{K_t}{K_x}, \quad (5)$$

где  $2\Delta x$  - неопределённость измерения физической величины;  $K_t$  - коэффициент относительной чувствительности устройства при  $t = \text{const}$ ;  $K_x$  - коэффициент относительной чувствительности устройства при  $x = \text{const}$ ;

ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №2 2009

$\hat{E}_{y\delta}$  - коэффициент эффективности процесса измерительного преобразования.

Как следует из приведенных соотношений, точность измерений, информативность и эффективность процесса измерительного преобразования близки по смыслу. Для улучшения этих показателей необходимо обеспечивать повышение чувствительности преобразователя по отношению к измеряемому сигналу и снижать чувствительность по отношению к дестабилизирующим факторам. С математических позиций этого можно добиться только за счет реализации нелинейности процесса измерительного преобразования, обеспечивающего усиление полезного сигнала и ослабление влияния дестабилизирующих факторов (рис. 2).

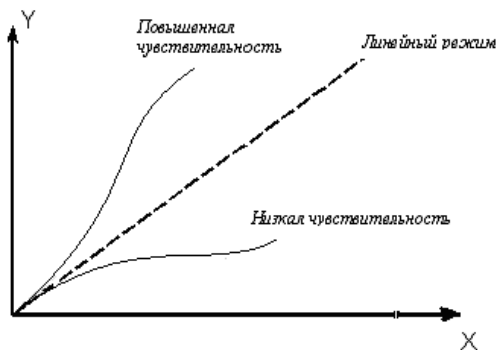


Рисунок 2 – Вид функций измерительного преобразования.

В связи с этим, можно сделать вывод о том, что для повышения информативности измерительного устройства необходимо обеспечить нелинейность на всех этапах преобразования измерительного сигнала. На этапе первичного измерительного преобразования этого можно достичь за счет использования нелинейных физических явлений, материалов, режимов работы измерительного преобразователя, соответствующей геометрии чувствительного элемента, за счет усиления сигнала, увеличения числа преобразователей и т.п. При передаче измерительной информации по каналам связи также необходимо осуществлять нелинейные преобразования сигнала: модуляцию, дискретизацию, квантование, кодирование, аналогово-цифровое преобразование измерительного сигнала. На этапе обработки измерительных

сигналов нелинейность функции преобразования может быть обеспечена за счет накопления и статистической обработки результатов многократных измерений, за счет реализации нелинейных алгоритмов и принципов обработки измерительной информации, использования нейросетевых технологий, реализации нелинейных процессов в сложных динамических системах и т.п.

С физической точки зрения представление процессов первичного измерительного преобразования в виде линейных функций, отражающих пропорциональную зависимость между входными ( $dx/x$ ;  $dt/t$ ) и выходными ( $dy/y$ ) относительными изменениями сигналов, является идеализацией реальных процессов. Поэтому для получения более адекватной аналитической зависимости, отражающей нелинейность измерительного устройства, воспользуемся разложением функции измерительного преобразования  $y = \varphi(x, t)$  в ряд Тейлора, ограничившись при этом только первыми членами ряда [3]:

$$y(x, t) = y(0; 0) + \left[ \left( \frac{dy}{dx} \right)_t \right] \cdot x + \left[ \left( \frac{dy}{dt} \right)_x \right] \cdot t + \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left[ \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right)_t \right] \cdot x^2 + \left[ \left( \frac{d^2 y}{dt^2} \right)_x \right] \cdot t^2 + \left[ \frac{d}{dx} \left( \frac{dy}{dt} \right)_x \right] \cdot x \cdot t + \left[ \frac{d}{dt} \left( \frac{dy}{dx} \right)_x \right] \cdot x \cdot t \right\} + \dots$$

Перейдя к относительным составляющим приращений переменных, получим:

$$\frac{\Delta y_x}{y} \approx \left( \frac{dy/y}{dx/x} \right)_t + \left( \frac{dy/y}{dt/t} \right)_x + \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left[ \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \cdot \frac{x^2}{y} \right)_t \right] + \left[ \left( \frac{d^2 y}{dt^2} \cdot \frac{t^2}{y} \right)_x \right] + \left[ \frac{d}{dx/x} \cdot \left( \frac{dy/y}{dt/t} \right)_x \right] + \left[ \frac{d}{dt/t} \cdot \left( \frac{dy/y}{dx/x} \right)_x \right] \right\}.$$

Преобразуем данную зависимость, используя понятия чувствительности по отношению к контролируемой величине и дестабилизирующему фактору:

$$(S)_t = \left( \frac{dy}{dx} \right)_t; \quad (S)_x = \left( \frac{dy}{dt} \right)_x; \quad (6)$$

$$\frac{\Delta y_x}{y} \approx \left( \frac{S_H}{S_E} \right)_t + \left( \frac{S_H}{S_E} \right)_x + \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left[ \frac{d}{dx/x} \cdot \left( \frac{S_H}{S_E} \right)_t \right] + \frac{d}{dt/t} \cdot \left( \frac{S_H}{S_E} \right)_x + \left[ \frac{d}{dx/x} \cdot \left( \frac{S_H}{S_E} \right)_x \right] + \left[ \frac{d}{dt/t} \cdot \left( \frac{S_H}{S_E} \right)_t \right] \right\}.$$

Произведя группировку составляющих относительно приращения по контролируемой величине и влияющему фактору, получим:

$$\left( \frac{\Delta y}{y} \right)_\Sigma = \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_x + \left( \frac{\Delta y}{y} \right)_t,$$

$$\frac{(\Delta y/y)_{\Sigma}}{(\Delta y/y)_t} - N = 1 + \frac{(\Delta y/y)_x}{(\Delta y/y)_t} = 1 + \hat{E}_{y\hat{o}}, \quad (7)$$

где  $\hat{E}_{y\hat{o}} = \frac{(\Delta y/y)_t}{(\Delta y/y)_x}$  – коэффициент эффективности процесса измерительного преобразования.

Параметр ( $\hat{E}_{y\hat{o}}$ ) учитывает влияние различных факторов на выходной сигнал измерительного устройства:

$$\hat{E}_{y\hat{o}} = \frac{\hat{E}_{\hat{o}}}{\hat{E}_t} = \frac{\left(\frac{S_H}{S_E}\right)_t + \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{d}{dx/x} \cdot \left(\frac{S_H}{S_E}\right)_{t,t} \right] + \left[ \frac{d}{dx/x} \cdot \left(\frac{S_H}{S_E}\right)_{x,t} \right]}{\left(\frac{S_H}{S_E}\right)_x + \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{d}{dt/t} \cdot \left(\frac{S_H}{S_E}\right)_{x,x} \right] + \left[ \frac{d}{dt/t} \cdot \left(\frac{S_H}{S_E}\right)_{t,x} \right]} \quad (8)$$

Данный критерий может быть использован в качестве обобщенной оценки эффективности выбранного метода измерения, при выборе материалов, реализуемых схем и режимов работы устройства, а также для сравнительной оценки метрологических характеристик различных вариантов построения измерительных устройств.

В простейшем случае, без учета взаимного влияния контролируемой величины и других факторов на чувствительность преобразователя, можно получить упрощенную формулу для критерия оценки эффективности процесса измерительного преобразования:

$$\hat{E}_{y\hat{o}} \approx \frac{\hat{E}_{\hat{o}}}{\hat{E}_t} \approx \frac{\left(\frac{dy}{y} / \frac{dx}{x}\right)_t}{\left(\frac{dy}{y} / \frac{dt}{t}\right)_x} \approx \frac{\left(\frac{S_H}{S_E}\right)_t}{\left(\frac{S_H}{S_E}\right)_x} \quad (9)$$

Из данной формулы следует, что коэффициент эффективности процесса первичного преобразования является сравнительной характеристикой относительной чувствительности устройства к изменению измеряемых физических величин и дестабилизирующих факторов. Очевидно, что наличие нелинейности процесса измерительного преобразования приводит к появлению дополнительной составляющей погрешности (нелинейности). Но при использовании современной микропроцессорной элементной базы не составляет большого труда осуществлять линеаризацию рабочих характеристик измерительных

устройств.

С энергетических позиций коэффициент нелинейности измерительного преобразования характеризует способность устройства усиливать изменение выходного сигнала по отношению к относительному изменению входного сигнала.

Для создания усилителей электрических сигналов используют нелинейные материалы; полупроводники; ферромагнетики; сегнетоэлектрики и т.п. При этом, усилительные способности таких устройств зависят от степени нелинейности используемых материалов.

В измерительной технике термин коэффициент усиления датчика не применяется, а используются понятия коэффициента относительной чувствительности и коэффициент передачи:

$$K_{\text{отн}} = \frac{\frac{dy}{y}}{\frac{dx}{x}} = \frac{\frac{dy}{dx}}{\frac{y}{x}} = \frac{S(x)}{K_{\text{ном}}} = \frac{K_{\text{действ.}}}{K_{\text{ном.}}} \quad (10)$$

Таким образом, применение нелинейных измерительных преобразователей позволяет не только повышать их относительную чувствительность, но и осуществлять усиление выходного сигнала устройства. Процесс усиления выходного сигнала датчика желательно реализовать непосредственно на физическом уровне в условиях максимального приближения к объекту измерения. Это позволит существенно повысить метрологические характеристики разрабатываемых измерительных устройств.

Вопрос повышения эффективности первичных измерительных устройств связан с оптимизацией выбора используемых физических эффектов, использованием нелинейных материалов, с оптимизацией конструктивных и схемных решений и режимов работы первичных измерительных преобразователей.

Для примера произведем сравнение коэффициентов эффективности проводниковых и полупроводниковых датчиков температуры. Для описания механизма чувствительности проводникового терморезистора воспользуемся упрощенной линейной зависимостью вида:

$$R_T = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (11)$$

С учетом наличия температурных изменений геометрических размеров преобразователя коэффициент относительной чувствительности (КОЧ) составит:

$$K_T = \frac{dR/R}{dT/T} = \frac{d\rho/\rho}{dT/T} + \frac{dl/l}{dT/T} - \frac{dS/S}{dT/T} \approx \frac{d\rho/\rho}{dT/T} - \frac{dl/l}{dT/T} \approx (K_T)_\rho - (K_T)_l \approx (K_T)_\rho,$$

где  $(K_T)_\rho$  – температурный коэффициент удельного сопротивления материала;  $(K_T)_l$  – коэффициент, учитывающий изменение геометрических размеров чувствительного элемента в функции температуры.

Сравним КОЧ проводникового  $(K_n)_T$  и полупроводникового  $(K_{nn})_T$  терморезисторов:

$$(K_i)_T \approx (K_\rho)_T \approx \frac{\alpha \dot{O}}{1 + \alpha \dot{O}}, \quad R_T \approx R_0 e^{\frac{\hat{A}}{T}},$$

$$(K_{ii})_T = \left| \frac{dR/R}{dT/T} \right| \approx \frac{B}{T}, \quad (12)$$

$$\frac{(\hat{E}_{ii})_T}{(K_i)_T} = \frac{B}{T} \left( 1 + \frac{1}{\alpha \dot{O}} \right). \quad (13)$$

Используя данные соотношения, сравним чувствительность платинового ( $\alpha = 3,9 \cdot 10^{-3} \hat{E}^{-1}$ ) и кремниевого ( $B = 4000$  К) терморезисторов. В окрестностях рабочей температуры датчика, равной, например,  $T = 300$  К получим:

$$\frac{(\hat{E}_{ii})_T}{(K_{Pt})_T} \approx 27. \quad (14)$$

Сравним эффективность проводниковых и полупроводниковых тензодатчиков при изменении рабочей температуры в определенном диапазоне. Считая, что основным дестабилизирующим фактором для большинства тензодатчиков является изменение температуры окружающей среды, можно дать грубую оценку их эффективности. Можно показать, что для проводниковых тензодатчиков коэф-

фициент эффективности может быть выражен следующей формулой:

$$(\hat{E}_i)_i = \frac{(K_i)_F}{(\hat{E}_i)_T} \approx \frac{(1 + 2\nu)}{\alpha T}; \quad (15)$$

Эффективность такого измерительного преобразования соблюдается при выполнении условия:

$$(\hat{E}_i)_i \geq 1 \quad \text{при} \quad T_Y \leq \frac{(1 + 2\nu)}{\alpha}, \quad (16)$$

Выражение для коэффициента эффективности полупроводниковых тензодатчиков можно представить в упрощенном виде:

$$(\hat{E}_i)_{ii} = \frac{(K_{ii})_{F\dot{O}}}{(\hat{E}_{ii})_T} \approx \frac{1 + 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{d\sigma/\sigma} + \frac{d\rho/\rho}{dT/T}}{B/T} \approx \frac{\left( \frac{d\rho/\rho}{d\sigma/\sigma} - \frac{B}{T} \right)}{B/T} \approx (K_\sigma)_o \cdot \frac{T}{B} - 1$$

Эффективность такого измерительного преобразования будет обеспечена при выполнении условия:

$$(\hat{E}_i)_{ii} \geq 1, \quad \dot{O}_Y \geq \frac{2\hat{A}}{(\hat{E}_\sigma)_o}. \quad (17)$$

Из полученных соотношений следует, что для проводниковых тензодатчиков рекомендуемый с позиций обеспечения эффективности измерительного преобразования верхний предел диапазона рабочих температур не превышал значения  $T \approx 400^\circ\text{K}$  ( $T \approx 130^\circ\text{C}$ ). Для полупроводниковых тензопреобразователей уже при  $T > 50^\circ\text{K}$  процесс измерительного преобразования теоретически мог бы являться эффективным, но с повышением рабочей температуры КОЧ полупроводникового тензопреобразователя уменьшается, что приводит к снижению его эффективности.

Необходимо отметить, что в настоящее время в справочной литературе практически отсутствует информация, характеризующая нелинейные свойства материалов. В связи с этим приведем ориентировочную оценку значений КОЧ для наиболее широко используемых в измерительной технике нелинейных материалов.

Для оценки КОЧ датчиков, основанных на использовании чувствительных элементов из полупроводниковых, ферромагнитных или сегнетоэлектрических материалов, воспользуемся известными соотношениями:

$$\begin{aligned}
 E(x; j) &= \rho(x; j) \cdot j(x); \\
 B(x; H) &= \mu(\delta; H) \cdot \mu_0 \cdot H(x); \\
 \ddot{A}(x; E) &= \varepsilon(x; E) \cdot \xi_0 \cdot E(x)
 \end{aligned}
 \quad (18)$$

Нелинейность такого типа датчиков определяется зависимостью удельного сопротивления полупроводников, магнитной проницаемости ферромагнетиков или диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков от измеряемых воздействий ( $x$ ), плотности тока ( $j$ ), значений напряженности электрического ( $E$ ) и магнитного поля ( $H$ ):

$$\frac{di}{dE} = g(E, x); \quad \frac{dB}{dH} = \mu(H, x); \quad \frac{dD}{dE} = \varepsilon(E, x). \quad (19)$$

На начальных участках характеристик можно считать, что соблюдается линейность функции измерительного преобразования:

$$\frac{j}{E} = g_{нач.}; \quad \frac{B}{H} = \mu_{нач.}; \quad \frac{D}{E} = \varepsilon_{нач.} \quad (20)$$

Для нелинейных участков характеристик КОЧ преобразователя будет зависеть от величины воздействующих параметров электрической и неэлектрической природы:

$$\hat{e}_j = \frac{\ddot{a}j}{\ddot{a}\hat{A}} \cdot \frac{j}{E} = \frac{g(j)}{g_{нач.}}; \quad k_H = \frac{\ddot{a}\hat{A}}{\ddot{a}\hat{I}} \cdot \frac{\hat{A}}{\hat{I}} = \frac{\mu(\hat{I})}{\mu_{нач.}}; \quad k_E = \frac{\ddot{a}D}{\ddot{a}E} \cdot \frac{D}{E} = \frac{\varepsilon(E)}{\varepsilon_{нач.}}.$$

Максимальные значения КОЧ для измерительных преобразователей можно определить, используя критические значения соответствующих параметров, имеющих в справочной литературе.

В таблицах 1 и 2 для примера приведены максимальные и минимальные значения магнитной проницаемости для некоторых марок стали и диэлектрической проницаемости для некоторых типов пьезоматериалов [4]. На основе этих данных были рассчитаны значения коэффициентов относительной чувствительности по отношению к изменению напряженностей электрических и магнитных полей.

Таблица 1

| Марка стали | $\mu_{нач} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}$<br>(Гн/м) | $\mu_{к} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}$<br>(Гн/м) | $(K_H)_{max}$ |
|-------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------|
| Э31         | 250                                            | 5500                                         | 22            |
| Э41         | 300                                            | 6000                                         | 20            |
| Э45         | 600                                            | 10000                                        | 16,7          |
| Э310        | 1000                                           | 30000                                        | 30            |

Таблица 2

| Материал пьезо-керамики | $\xi_{нач}$                 | $\xi_{макс}$               | $(K_E)_{max}$ |
|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------|
| BaTiO3                  | $(1,7 \div 2) \cdot 10^3$   | $(6 \div 8) \cdot 10^3$    | $3 \div 4,5$  |
| Bk1                     | $(2,3 \div 2,5) \cdot 10^3$ | $(16 \div 20) \cdot 10^3$  | $6 \div 8$    |
| Bk2                     | $(2 \div 2,5) \cdot 10^3$   | $(35 \div 45) \cdot 10^3$  | $15 \div 20$  |
| Bk5                     | $(2 \div 3) \cdot 10^3$     | $(80 \div 100) \cdot 10^3$ | $35 \div 50$  |

Таким образом, в основу создания высокочувствительных измерительных устройств могут быть положены различные эффекты, обеспечивающие нелинейность процесса измерительного преобразования.

Например, в магнитоупругих анизотропных датчиках усилий под действием механических напряжений происходит деформация магнитных полей в теле преобразователя, что является основным фактором, объясняющим их высокую силовую чувствительность.

В емкостных датчиках для повышения чувствительности используется неравномерность картины силовых линий напряженности электрического поля между обкладками конденсатора. При этом, чем выше степень неравномерности поля в материале, тем выше чувствительность датчиков.

Получение точных аналитических зависимостей для оценки коэффициента относительной чувствительности нелинейных датчиков чаще всего является крайне сложной задачей. Применение предложенного критерия позволяет произвести сравнительную оценку эффективности различных типов датчиков по результатам экспериментальных исследований.

Для примера, можно привести сравнительную оценку по результатам экспериментальных исследований эффективности различных вариантов построения пьезорезонансных датчиков вязкости: для дифференциального пьезотрансформаторного преобразователя (а); амплитудного варианта датчика (б) и для частотного варианта датчика (с):

$$\begin{aligned}
 & \text{a) } \frac{\left( \Delta \frac{U_1}{U_2} \right)_\eta}{\left( \frac{U_1}{U_2} \right)} \bigg/ \frac{\left( \Delta \frac{U_1}{U_2} \right)_t}{\left( \frac{U_1}{U_2} \right)} \approx \frac{0,18}{0,007} \approx 25,5; \\
 & \text{b) } \left( \frac{\Delta U}{U} \right)_\eta \bigg/ \left( \frac{\Delta U}{U} \right)_t \approx \frac{0,5}{0,093} \approx 5,4; \\
 & \text{c) } \left( \frac{\Delta \omega}{\omega} \right)_\eta \bigg/ \left( \frac{\Delta \omega}{\omega} \right)_t \approx \frac{0,0084}{0,0029} \approx 2,9.
 \end{aligned}$$

Измерения вязкости производились в диапазоне от 0 до 20 Па·с при изменении температуры окружающей среды в пределах от 20°C до 60°C.

Применяя данный критерий сравнительной оценки эффективности различных типов датчиков, можно сделать вывод о том, что дифференциальный вариант датчика обеспечивает более высокую эффективность процесса измерительного преобразования.

Использование первичных преобразователей с высокой нелинейностью процесса измерительного преобразования может послужить основой для создания высокочувствительных, высокоэффективных измерительных устройств, способных измерять слабые сигналы в условиях сильных воздействий дестабилизирующих факторов, контролировать сверхмалые изменения различных физических величин. В основу разработки таких устройств должны быть положены определенные принципы обеспечения нелинейности процессов измерительного преобразования. К их числу могут быть отнесены:

- поиск и рациональное использование нелинейных физических эффектов с целью создания на их основе высокоэффективных первичных измерительных преобразователей;
- использование нелинейных материалов для создания чувствительных элементов датчиков;

- поиск специальных конструктивных решений с целью повышения чувствительности первичных измерительных преобразователей;

- использование нелинейных режимов работы первичных преобразователей и измерительных устройств в целом;

- использование нелинейных методов обработки измерительных сигналов (статистическая обработка результатов многократных измерений, спектральный фурье-анализ, вейвлет-анализ и т.п.);

- использование измерительных схем с обратными связями (например, создание высокочувствительных интеллектуальных нейроноподобных измерительных устройств, обеспечивающих нелинейные принципы преобразования измерительной информации);

- применение нелинейных методов анализа и обработки измерительной информации с использованием современных компьютерных технологий и т.п.

Таким образом, реализация нелинейных принципов при разработке измерительных устройств позволит повысить их эффективность, экономичность, надежность работы, что в итоге обусловит и повышение качества выпускаемой продукции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
2. Электрические измерения неэлектрических величин / Под ред. П.В. Новицкого. – Л.: Ленинградское отд. «Энергия», 1975.
3. Седалищев В.Н., Хомутов О.И. Высокочувствительные пьезорезонансные датчики с использованием связанных колебаний для экстремальных условий эксплуатации: монография. Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006.
4. Дубровский И.М., Егоров Б.В., Рябошапка К.П. Справочник по физике. – Киев: Изд-во «Наукова думка», 1986.