

**Гладков Леонид Анатольевич** – Южный федеральный университет; e-mail: lagladkov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371625; кафедра САПР; доцент.

**Гладкова Надежда Викторовна** – e-mail: nvgladkova@sfedu.ru; тел.: 88634393260; кафедра САПР; старший преподаватель.

**Gladkov Leonid Anatol'evich** – Southern Federal University; e-mail: lagladkov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371625; the department of CAD; associate professor.

**Gladkova Nadezhda Viktorovna** – e-mail: nvgladkova@sfedu.ru; phone: +78634393260; the department of CAD; senior teacher.

УДК 681.2.089

DOI 10.18522/2311-3103-2021-4-61-73

**С.И. Клевцов**

### **ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА МОДЕЛИ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН**

*Рассматриваются вопросы выбора вида и параметров модели характеристики преобразования интеллектуального датчика физических величин на примере датчика давления. Характеристика преобразования интеллектуального датчика представляет собой математическое, алгоритмическое и программное обеспечение для вычисления физической величины на основе электрических сигналов, которые поступают с измерительных каналов датчика. Модель характеристики преобразования должна быть адаптирована к конфигурации функции преобразования чувствительного элемента датчика и особенностям поведения этой функции при воздействии внешних дестабилизирующих факторов. В работе рассмотрены различные модели характеристики преобразования, определены особенности их применения, достоинства и недостатки, достижимые уровни погрешности аппроксимации реальной характеристики, которые влияют на конечную точность измерений интеллектуального датчика. Интеллектуальные датчики используются для задач измерения физических величин в различных технических системах и требования к точности измерений в реальных задачах различны. Точность измерений в значительной степени определяется степенью аппроксимации реальной характеристики датчика ее математической моделью. Чем сложнее модель, тем, как правило, сложнее ее реализовать в датчике и тем выше стоимость измерений. Поэтому важно управлять погрешностью аппроксимации характеристики преобразования, чтобы эффективно использовать датчик. Для управления погрешностью аппроксимации характеристики преобразования интеллектуального датчика давления предложено воспользоваться методом мультиотрезочной пространственной аппроксимации, а в качестве сегментов использовать модели линейных или нелинейных пространственных элементов. Определены основные математические выражения, схема управления погрешностью. Представлены результаты моделирования, которые показывают возможность и преимущества использования метода для формирования пространственных моделей характеристики преобразования, которые адаптивны к изменениям реальной функции преобразования датчика, учитывают влияние внешних факторов на результаты измерений. Кроме того, метод позволяет модифицировать текущую модель пространственной аппроксимации, изменяя типы локальных пространственных элементов и таким образом, управлять погрешностью измерений.*

*Модель; интеллектуальный датчик; характеристика преобразования; погрешность; аппроксимация.*

S.I. Klevtsov

## SELECTING FEATURES OF THE MODEL TRANSFORMATION CHARACTERISTICS FOR AN INTELLIGENT PHYSICAL QUANTITY SENSOR

*The paper discusses the issues of choosing the type and parameters of the model of the transformation characteristic of an intelligent sensor of physical quantities using the example of a pressure sensor. The transformation characteristic of an intelligent sensor is a mathematical, algorithmic and software for calculating a physical quantity based on electrical signals that come from the measuring channels of the sensor. The model of the conversion characteristic should be adapted to the configuration of the conversion function of the sensor's sensitive element and the behavior of this function under the influence of external destabilizing factors. The paper considers various models of the conversion characteristics, identifies the features of their application, advantages and disadvantages, attainable levels of approximation error of the real characteristic, which affect the final measurement accuracy of the smart sensor. Smart sensors are used for measuring physical quantities in various technical systems and the requirements for measurement accuracy in real-life tasks are different. The measurement accuracy is largely determined by the degree of approximation of the real characteristics of the sensor by its mathematical model. The more complex the model, the more difficult it is to implement in the sensor, and the higher the measurement cost. Therefore, it is important to control the conversion characteristic approximation error in order to use the sensor efficiently. To control the approximation error of the transformation characteristic of an intelligent pressure sensor, it is proposed to use the method of multi-segment spatial approximation, and use models of linear or nonlinear spatial elements as segments. The basic mathematical expressions, the error control scheme are determined. The results of modeling are presented, which show the possibility and advantages of using the method for the formation of spatial models of the transformation characteristics, which are adaptive to changes in the real transformation function of the sensor, take into account the influence of external factors on the measurement results. In addition, the method allows you to modify the current spatial approximation model by changing the types of local spatial elements and, thus, to control the measurement error.*

*Model; intelligent sensor; transformation characteristic; error; approximation.*

**Введение.** Одной из важных задач разработки методов обработки результатов измерений в интеллектуальных датчиках является повышение точности и достоверности определения значений физических величин. Точность измерений во многих случаях определяет надежность и безопасность работы различных технических объектов. В интеллектуальном датчике используется модель характеристики преобразования, которая адаптирована к конфигурации функции преобразования чувствительного элемента датчика и особенностям поведения этой функции при воздействии внешних дестабилизирующих факторов.

Известно, что для аналогового датчика необходима линеаризация характеристики преобразования, которая достигается конструктивными и схемотехническими методами [1, 2]. Интеллектуальный датчик использует для определения характеристику преобразования, представленную в виде математических выражений и алгоритмов их реализации. Модель характеристики преобразования должна повторять форму реальной характеристики [3, 4]. Точность аппроксимации определяется требованиями задач, решаемых датчиком.

Таким образом, при построении модели характеристики преобразования интеллектуального датчика медленно меняющихся физических величин, например, давления, решается задачи формирования ее аппроксимации, которая должна соответствовать заданным требованиям. Выделим основные требования: заданная точность в диапазонах изменения физического сигнала и внешних факторов и допустимый уровень сложности вычислений. Требования к сложности вычислений связаны с возможностью реализации измерений в реальном времени с высокой скоростью, часто, в фоновом режиме.

Погрешность измерения физической величины интеллектуальным датчиком в значительной степени определяется выбором модели характеристики преобразования и, соответственно, погрешностью аппроксимации этой характеристики [5, 6]. Требования к точности измерений, в свою очередь, формируются исходя из анализа задач, которые решаются с использованием измеренных значений. Достижение высокой точности вычислений часто связано со сложными и ресурсоемкими моделями и алгоритмами и во многих случаях не нужно для решения поставленной задачи. Поэтому, при выборе модели характеристики преобразования датчика следует исходить из соображений достижения уровня достаточной точности вычислений значений физической величины.

#### **Модели характеристики преобразования датчика физических величин.**

Для обработки сигналов физических величин в интеллектуальных датчиках, таких как датчики давления, используются различные модели характеристик преобразования, которые базируются на пространственном представлении функции преобразования чувствительного элемента [1–10]. В этих моделях используется единое представления характеристики для всей области изменения полезного сигнала и внешних факторов.

Для градуировки датчика широко применяется простая кусочно-линейная аппроксимация характеристики датчика [1, 2, 6, 8]. Использование этой модели оправдано при незначительной нелинейности функции преобразования чувствительного элемента и невысоких требованиях к точности измерений.

Количество идентификационных точек, используемых для аппроксимации, зависит от требуемой точности. Для обеспечения приведенной относительной погрешности измерения давления не выше 0,5 % в работе [2] был выбран массив, содержащий 51 идентификационную точку области определения характеристики преобразования. Число калибровочных точек по оси давления ( $P$ ) выбрано равным 17, а по оси температур ( $T$ ) составляет три точки. В качестве калибровочной ординаты выбран код 12-разрядного АЦП. Выбор точек массива и запись в память контроллера осуществлялись на этапе калибровки датчика, а схема расчета давления состояла из нескольких шагов.

В результате использования модели кусочно-линейной аппроксимации удалось уменьшить погрешность, связанную с нелинейностью функции преобразования с 5 % до 0,05 %, а температурную погрешность с 2,5 % до 0,1 % (на каждые  $10^{\circ}\text{C}$ ).

Однако, при проведении измерений в диапазоне температур от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$  и используя результаты калибровки при  $T_{\text{ср}}=20^{\circ}\text{C}$  получим только температурную составляющую погрешности на границах указанного диапазона порядка 0,6%. Тем не менее, его использование целесообразно и оправдано, когда к датчику не предъявляются высокие требования по точности.

В работе [9] модель характеристики преобразования представляет собой набор плоскостей, построенных на основе пересекающихся в пространстве  $P \times U_P \times U_T$  прямых.

Пусть функция  $P=P(U_P, U_T)$  имеет область определения  $D(U_P, U_T)$ :  $U_P \in [U_{P1}, U_{P2}]$ ,  $U_T \in [U_{T1}, U_{T2}]$ . Разобьем область определения по оси  $OU_P$  на  $k$  равных частей и по оси  $OU_T$  на  $l$  равных частей. Получим  $k \times l$  прямоугольных участков.

Будем приближать поверхность модели характеристики преобразования плоскостями на каждом участке  $D_{n,m}$ . Зафиксируем на участке  $D_{n,m}$  средние значения переменных  $U_{\text{ср},n}$  и  $U_{\text{ср},m}$

$$U_{\text{ср},n} = U_{P1,n} + (U_{P2,n} - U_{P1,n})/2,$$

$$U_{\text{ср},m} = U_{T1,m} + (U_{T2,m} - U_{T1,m})/2,$$

где  $U_{P1,n}$ ,  $U_{P2,n}$ ,  $U_{T1,m}$ ,  $U_{T2,m}$  – границы участка  $D_{n,m}$ .

Выражения  $P_{1,n,m} = P_{1,n,m}(U_{Pcp,n}, U_T)$  и  $P_{2,n,m} = P_{2,n,m}(U_P, U_{Tcp,m})$  определяют взаимно перпендикулярные плоскости в пространстве  $P \times U_P \times U_T$ , каждая из которых также перпендикулярна плоскости  $P=0$ .

Используя экспериментальные данные, определяющие зависимость  $P=P(U_P, U_T)$ , где значения  $U_P, U_T \in D_{n,m}$ , методом наименьших квадратов получим уравнения двух прямых  $P'_{1,n,m}(U_T) \in P_{1,n,m}$  и  $P'_{2,n,m}(U_P) \in P_{2,n,m}$ .

Эти прямые принадлежат перпендикулярным плоскостям и являются скрещивающимися. Плоскости  $P_{1,n,m}$  и  $P_{2,n,m}$  пересекаются по прямой, перпендикулярной плоскости  $P=0$ , а сама прямая пересекает эту плоскость в точке с координатами  $(U_{Pcp,n}, U_{Tcp,m})$ .

Для построения пересекающихся прямых  $P''_{1,n,m}(U_T)$  и  $P''_{2,n,m}(U_P)$  необходимо скрещивающиеся прямые сблизить на расстояние  $\delta P = |P'_{1,n,m}(U_{Tcp,m}) - P'_{2,n,m}(U_{Pcp,m})|$ , как показано на рис. 1.

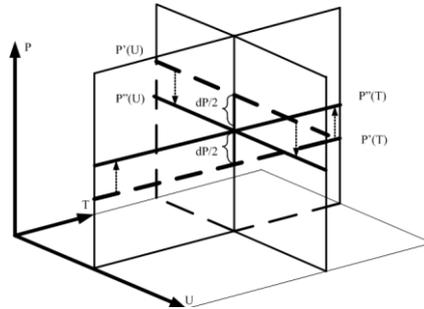


Рис. 1. Схема формирования пересекающихся прямых

Построение плоскости по двум пересекающимся прямым  $P''_{1,n,m}(U_T)$  и  $P''_{2,n,m}(U_P)$  осуществляется методами линейной алгебры. Таким образом, при аппроксимации указанным способом формируется система плоскостей, покрывающая всю поверхность характеристики датчика. Следует отметить, что на границах областей  $D_{mn}$  области определения  $U_P \times U_T$  построенные плоскости, практически не соприкасаются. Это приводит к дополнительной ошибке аппроксимации, которую необходимо учитывать при использовании данного метода вычисления давления.

Модифицированный алгоритм линеаризации характеристики преобразования и температурной компенсации при вычислении давления предложен в работе [8].

В основе алгоритма лежит определение зависимости кода выходного параметра  $P_{код}$ , характеризующего сигнал давления, от кода температуры  $T_{код}$  на прямоугольной сетке с равноотстоящими узлами ко каждой координате, причем для удобства вычислений в контроллере число интервалов разбиения области параметров, то есть давления и температуры, должно быть равно целой степени двух.

На этой основе формируется двумерная таблица значений кодов, которая используется для вычисления давления с учетом влияния температуры. Вычисление давления при промежуточных значениях кодов давления и температуры, не указанных в таблице, осуществляется с помощью аппроксимации по имеющимся точкам в таблице.

Результаты испытаний датчика с использованием микроконтроллера MSP430 с аппаратным умножителем показали, что алгоритм способен обеспечить погрешность не более  $\pm 1$  значащего разряда при 12-разрядном АЦП. Также отмечается высокая скорость реализации алгоритма [8].

В настоящее время в случае, если требуются более точные измерения давления, для аппроксимации характеристики преобразования используются полиномы. Давление представляется полиномиальной функцией электрического сигнала, снимаемого с измерительного канала давления аналоговой части датчика. В матричном виде соотношения, определяющие модель, выглядят следующим образом [10–13]:

$$P = [1 \quad U \quad U^2] \times \begin{vmatrix} \gamma_{00} & \gamma_{01} & \gamma_{02} \\ \gamma_{10} & \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{20} & \gamma_{21} & \gamma_{22} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 \\ T \\ T^2 \end{vmatrix},$$

$$P = [1 \quad U] \times \begin{vmatrix} \gamma_{00} & \gamma_{01} & \gamma_{02} \\ \gamma_{10} & \gamma_{11} & \gamma_{12} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 \\ T \\ T^2 \end{vmatrix}.$$

Для упрощения вычислений обычно формируется единое представление характеристики преобразования для всего диапазона измеряемой физической величины и внешнего воздействующего фактора и, следовательно, определяется один набор коэффициентов аппроксимации.

В работе [10] показано, что компенсация характеристик пьезорезисторного кремниевых сенсора давления с использованием аппроксимации обратной функции передачи сенсора полиномом второго порядка по давлению и температуре позволила снизить максимальную погрешность измерения по отношению к характеристике сенсора в идеальном случае до  $\pm 0,2\%$ , а в температурном диапазоне от 0 до  $70^\circ\text{C}$  – до значений менее  $\pm 0,1\%$ . Температурная зависимость напряжения смещения нуля при этом находится в границах  $\pm 0,2\%$  полного диапазона. Температурная компенсация уменьшила температурную зависимость чувствительности в 3,16 раза по отношению к некомпенсированному сенсору, чувствительность увеличилась 1,65 раза, максимальная нелинейность характеристики уменьшена в 26 раз.

Однако, указанный результат был достигнут при использовании довольно значительного массива исходных данных, примерно 10000 точек, что сложно реализовать при производстве партии датчиков.

**Управление погрешностью аппроксимации при выборе пространственной модели характеристики преобразования датчика.** Для управления погрешностью аппроксимации характеристики преобразования датчика можно воспользоваться методом мультисегментной пространственной аппроксимации (МСПА ХП), а в качестве сегментов использовать модели линейных или нелинейных пространственных элементов [13–20]. В методе реальная характеристика преобразования заменяется системой локальных поверхностей. При этом эти поверхности в совокупности повторяют форму реальной характеристики. Тип сегмента, его геометрические параметры позволяют управлять точностью аппроксимации характеристики преобразования датчика в зависимости от требований задачи, которую он решает.

Метод базируется на нескольких основных положениях [13, 19, 20].

Модель пространственной характеристики преобразования должна повторять конфигурацию функции преобразования чувствительного элемента с учетом влияния внешних и внутренних факторов, таких как температура, нелинейность, дрейф нуля.

Пространственная аппроксимация характеристики преобразования датчика должна удовлетворять требованиям, которые определяются решаемой задачей. Основные требования: погрешность аппроксимации характеристики в заданном диапазоне измерения физической величины и изменения дестабилизирующего фактора и уровень сложности вычислений.

Пространственная аппроксимация характеристики преобразования формируется системой локальных линейных или нелинейных пространственных элементов (сегментов). Потенциально возможным вариантом может быть использование не-

линейных и нелинейных элементов в одной модели характеристики преобразования. Использование линейной или нелинейной функции для формирования пространственного элемента определяется требованиями задачи и реальной пространственной конфигурацией функции преобразования чувствительного элемента.

Сшивка пространственных элементов модели на границе раздела их областей определения не является необходимой. Более того, сшивка элементов может ограничить возможности в подборе функциональных зависимостей, формирующих сегменты. Поэтому пространственные элементы могут перекрывать друг друга (рис. 2) Важно только обеспечить на границе раздела достижение заданной погрешности аппроксимации характеристики преобразования при выборе любого из сегментов в процессе проведения измерений.

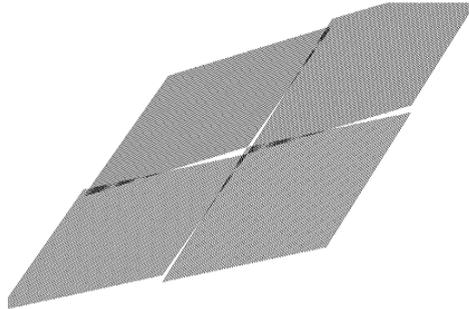


Рис. 2. Схема перекрытия пространственных элементов, аппроксимирующих характеристику преобразования

Наиболее опасным внешним воздействующим фактором, существенно влияющим на погрешность измерения медленно меняющейся физической величины, например, давления, является температура окружающей среды. Тогда в общем виде пространственная модель характеристики преобразования датчика давления с учетом влияния температуры представляется выражением:

$$P_t = P(U_{Pt}, U_{Tt}, \bar{\gamma}_{\alpha\beta}, \Omega_{\alpha\beta}, F_{\alpha\beta}, \varepsilon_P),$$

где  $P_t$  – значение давления в момент времени  $t$ ;

$U_{Pt}$  – значение электрического сигнала, снимаемого с измерительного канала давления аналоговой части интеллектуального датчика (далее, канал давления датчика) в момент времени  $t$ ;

$U_{Tt}$  – значение электрического сигнала, снимаемого с измерительного канала температуры аналоговой части интеллектуального датчика (далее, сигнал канала температуры) в момент времени  $t$ ;

$\Omega_{\alpha\beta} = \bar{U}_{P\alpha} \cup \bar{U}_{T\beta}$  – область определения  $\alpha$ -го сегмента характеристики,

$\alpha$  – номер интервала разбиения области изменения сигнала канала давления,

$\alpha = 1, \dots, L_P$ ;

$\beta$  – номер интервала разбиения области изменения сигнала канала темпера-

туры,  $\beta = 1, \dots, L_T$ ;

$L_{PT}$  – общее количество сегментов;

$\bar{U}_{P\alpha} = \{U_P \in [U_{P,\alpha-1}, U_{P,\alpha}]\}$  – диапазон изменений значений электрического сигнала по каналу давления для области определения  $\alpha$ -го сегмента;

$U_{P,\alpha-1}, U_{P,\alpha}$  – нижняя и верхняя границы диапазона  $\bar{U}_{P\alpha}$ ;

$\bar{U}_{T\beta} = \{U_T \in [U_{T,\beta-1}, U_{T,\beta}]\}$  – диапазон изменений значений электрического сигнала по каналу температуры для области определения  $\beta$ -го сегмента;

$U_{T,\beta-1}, U_{T,\beta}$  – нижняя и верхняя границы диапазона  $\bar{U}_{T\beta}$ ;  
 $\bar{\gamma}_{\alpha\beta}$  – массив значений коэффициентов аппроксимации -го сегмента характеристики;  
 $F_{\alpha\beta}$  – функция, аппроксимирующая -й сегмент характеристики датчика;  
 $\varepsilon_p$  – максимальная погрешность аппроксимации характеристики преобразования.

Для построения МСПА ХП датчика используется информация о поведении функции преобразования чувствительного элемента (ЧЭ) при воздействии измеряемой физической величины и наиболее значимого внешнего фактора, в данном случае, давления и температуры. Эти данные получают в результате градуировочных испытаний и объединяются в массив значений электрических сигналов канала давления и канала температуры [19].

Можно использовать различные функциональные зависимости для построения сегментов МСПА ХП датчика в виде локального линейного элемента (плоскости) или локального нелинейного элемента (поверхности).

Если задача заключается в достижении приемлемой точности аппроксимации и низкой сложности вычислений в микроконтроллере, то для аппроксимации характеристики преобразования целесообразно использовать представление в виде системы сегментов, каждый из которых является линейным пространственным элементом (ЛПЭ) в пространстве измеряемых параметров [13, 16, 19, 20].

Однако, если требуется более высокая точность вычислений, то в качестве элементов модели характеристики преобразования целесообразно использовать нелинейные пространственные элементы (НПЭ) [13, 19, 20].

Возможен вариант, когда в области определения характеристики преобразования можно выделить подобласти, которые обладают более низкой нелинейностью по сравнению с другими. Тогда можно комбинировать использование ЛПЭ и НПЭ для управления погрешностью и снижения сложности вычислений.

Наиболее приемлемыми моделями сегментов являются плоскости и поверхности в виде полинома [13, 16, 18–20].

Модель аппроксимирующей плоскости:

$$P = A_{\alpha\beta} + B_{1\alpha\beta} \cdot U_{Pt} + B_{2\alpha\beta} \cdot U_{Tt}, \quad (1)$$

где  $A_{\alpha\beta}, B_{1\alpha\beta}, B_{2\alpha\beta}$  – коэффициенты аппроксимации для формирования сегмента  $\Pi_{UT}^{\alpha\beta}$  в его области определения  $\Omega_{\alpha\beta}$  в виде линейного пространственного элемента.

Модель аппроксимирующей поверхности в виде полинома второй или третьей степени:

$$P = \sum_{i=0}^l a_i^{\alpha\beta} \cdot U_{Pt}^i, \quad l = 2, 3 \quad (2)$$

$$a_i^{\alpha\beta} = \sum_{l=0}^L \gamma_{il}^{\alpha\beta} \cdot U_{Tt}^l, \quad L = 2, 3, \quad (3)$$

где  $a_i^{\alpha\beta}$  и  $\gamma_{il}^{\alpha\beta}$  – коэффициенты аппроксимации для формирования сегмента  $\Pi_{UT}^{\alpha\beta}$  в его области определения  $\Omega_{\alpha\beta}$  в виде нелинейного пространственного элемента. Коэффициенты  $a_i^{\alpha\beta}$  зависят только от температуры, а  $\gamma_{il}^{\alpha\beta}$  – не зависят от температуры и являются постоянными величинами для каждого сегмента  $\Pi_{UT}^{\alpha\beta}$ ;

$U_{Pt}$  и  $U_{Tt}$  – значения электрических сигналов канала давления и канала температуры датчика в момент времени  $t$ .

Выражение (2) учитывает нелинейность характеристики при фиксированной температуре, а выражение (3) описывает нелинейность характеристики при изменении температуры.

Коэффициенты аппроксимации в выражениях (1), (2) и (3) определяются с помощью метода наименьших квадратов для каждого сегмента  $P_{\text{УТ}}^{\alpha\beta}$ .

Использование метода МСПА ХП датчика для вычислений значений давления с компенсацией влияния температуры осуществляется следующим образом:

Исходными данными для вычислений являются значения электрических сигналов канала давления  $U_{Pk}$  и канала температуры  $U_{Tk}$ . Они соответствуют физическим сигналам давления  $P_k$  и температуры  $T_k$ .

По известным значениям электрических сигналов  $U_{Pk}$  и  $U_{Tk}$  находится область определения сегмента пространственной характеристики преобразования. На первом этапе определяется номер интервала разбиения по температуре  $\beta$ , которой принадлежит текущее значение электрического сигнала канала температуры ( $U_{Tk} \in \Omega_{\alpha\beta}$ ). Затем, используя найденный номер интервала разбиения по температуре  $\beta$ , находится номер интервала разбиения  $\alpha$ , которой принадлежит текущее значение сигнала канала давления ( $U_{Pk} \in \Omega_{\alpha\beta}$ ).

Для полученной области определения сегмента  $\Omega_{\alpha\beta}$  выбирается соответствующий этой области определения сегмент, сформированный на этапе построения модели. Фактически используется соответствующее сегменту функциональное выражение и значения коэффициентов аппроксимации.

Вычисляется давление согласно выражениям (1) или (2), используя выбранные коэффициенты аппроксимации и значений электрических сигналов каналов давления и температуры.

**Результаты моделирования пространственной характеристики преобразования.** Проверка возможности управления погрешностью при использовании МСПА ХП в интеллектуальном датчике осуществлялась на основе данных градуировочных испытаний двух чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков давления, ЧЭ №1 и ЧЭ №2, рассчитанных на измерение давления до 60 кгс/см<sup>2</sup> и 10 кгс/см<sup>2</sup> соответственно в диапазоне температур от - 40<sup>0</sup>С до +80<sup>0</sup>С.

Представленные данные испытаний характеризуются небольшой нелинейностью при фиксированной температуре. Нелинейность фиксировалась на начальном и конечном участках диапазона изменения давления. Зависимость выходного сигнала ЧЭ от температуры значительная и имеет нелинейный характер. При низких температурах наблюдается увеличение сигнала при росте температуры, при высоких температурах при росте температуры сигнал уменьшается.

Реальная функция преобразования ЧЭ представляет собой поверхность в системе параметров  $P \times U_p \times U_T$ . Нижняя и верхняя части поверхности (по оси давления) повернуты друг относительно друга относительно условной линии раздела. Например, для ЧЭ № 2, при  $P \sim 360-380$  КПа.

Для интеллектуального датчика с ЧЭ №1 пространственная характеристика преобразования формировалась на основе ЛПЭ размерами 6 кгс/см<sup>2</sup>  $\times 20^\circ\text{C}$ , НПЭ – 12 кгс/см<sup>2</sup>  $\times 40^\circ\text{C}$ . Для интеллектуального датчика с ЧЭ №2 размеры ЛПЭ были выбраны 1 кгс/см<sup>2</sup>  $\times 20^\circ\text{C}$ , а НПЭ – 2 кгс/см<sup>2</sup>  $\times 40^\circ\text{C}$ .

На размеры пространственных элементов влияют объемы испытаний. В данном случае были выбраны размеры, наименьшие из возможных.

На рис. 3, 4 представлены графики относительной погрешности аппроксимации характеристики преобразования ЧЭ №1 с использованием ЛПЭ и НПЭ при температурах  $T = -40^\circ\text{C}$  и  $T = 80^\circ\text{C}$ .

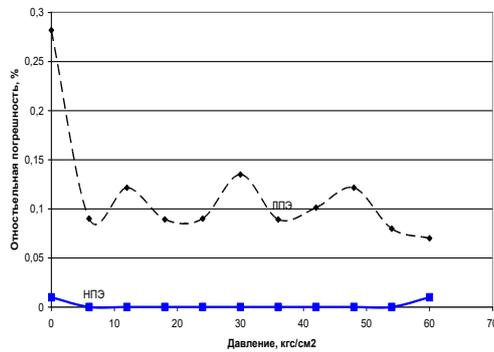


Рис. 3. График относительной погрешности аппроксимации характеристики преобразования датчика с ЧЭ №1 при  $T = -40^{\circ}\text{C}$  (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

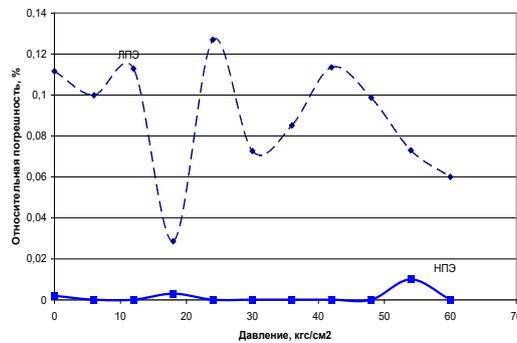


Рис. 4. График относительной погрешности аппроксимации характеристики преобразования датчика с ЧЭ №1 при  $T = 80^{\circ}\text{C}$  (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

На рис. 5 и 6 представлены аналогичные графики относительной погрешности аппроксимации характеристики преобразования для ЧЭ №2.

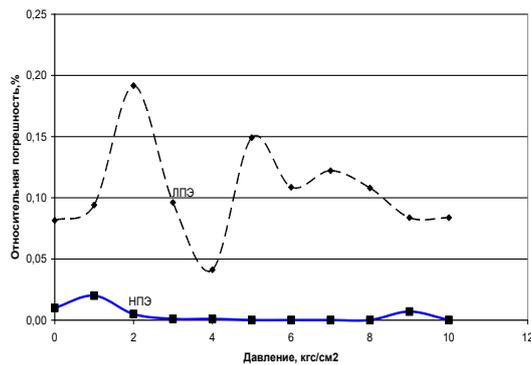


Рис. 5. График относительной погрешности аппроксимации характеристики преобразования датчика с ЧЭ №2 при  $T = -40^{\circ}\text{C}$  (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

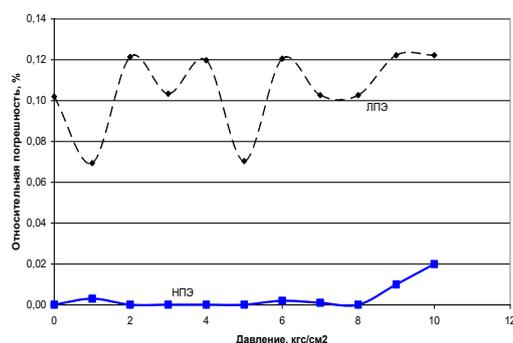


Рис. 6. График относительной погрешности аппроксимации характеристики преобразования датчика с ЧЭ №2 при  $T = 80^{\circ}\text{C}$  (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

**Заключение.** Анализ результатов моделирования показывает, что наименьшая погрешность аппроксимации характерна для случая использования нелинейных пространственных элементов. Например, относительная погрешность аппроксимации характеристики преобразования с использованием НПЭ на подобласти размером  $2 \text{ кгс/см}^2 \times 40^{\circ}\text{C}$  для ЧЭ № 2 не выше 0,03% в диапазоне изменения давления от  $0 \text{ кгс/см}^2$  до  $10 \text{ кгс/см}^2$  и температур от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $80^{\circ}\text{C}$ .

В случае использования линейных пространственных элементов погрешность аппроксимации выше. Для ЧЭ №1 и №2 погрешность аппроксимации заключена в среднем в диапазоне  $0,1\% \pm 0,05\%$ , что значительно выше по сравнению с погрешностью при применении НПЭ. Плоскостная модель сегмента МСПА ХП, естественно, менее чувствительна к нелинейностям исходной функции преобразования ЧЭ, ее адаптационные способности ниже относительно нелинейно модели.

Однако, если задача, поставленная перед датчиком, не требует очень высокой точности измерений, то целесообразно использовать линейные модели сегментов, поскольку они характеризуются низкой сложностью и, соответственно, простотой вычислений давления. Это влияет на выбор контроллера датчика, его стоимость и стоимость измерений.

Порядок использования МСПА ХП для вычислений давления с учетом влияния температуры способствует комбинированному применению линейных и нелинейных пространственных элементов в рамках одной модели МСПА ХП. Но процедура подбора типа сегмента должна начинаться с оценки возможности использования сначала линейного пространственного элемента, а в случае невозможности выполнения требований по точности, анализа использования нелинейного элемента.

Кроме того, метод построения МСПА ХП позволяет модифицировать текущую модель пространственной аппроксимации, изменяя типы локальных пространственных элементов и таким образом, управлять погрешностью измерений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hillea P., Höhlera R., Stracka H. A Linearisation and Compensation Method for Integrated Sensors // Sensors and Actuators A: Physical. – 1994. – Vol. 44, Issue 2. – P. 95-102.
2. Бобровников Н.Р., Яркин С.В., Гридин Ю.Н., Стрыгин В.Д., Чертов Е.Д. Математическое обеспечение микропроцессорных преобразователей аналоговых пневматических сигналов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – № 2. – С.36-39.
3. Bartkovejak J., Karovičová M. Approximation by Rational Functions // Measurement Science Review. – 2001. – Vol. 1, No. 1. – P. 63-65.

4. Гутников В.С. Тенденции развития электронных измерительных преобразователей для датчиков // Приборы и системы управления. – 1990. – № 10. – С. 32-35.
5. Bluemm C. Weiss R. Weigel R. Brenk D. Correcting nonlinearity and temperature influence of sensors through B-spline modeling // Industrial Electronics (ISIE). 2010. IEEE International Symposium. 4-7 July 2010. – P. 3356-3361.
6. Gorbunov S.F., Tsylin B.V. Linearization of calibration characteristics of capacitance pressure sensors // Measurement Techniques. – 2011. – Vol. 53, No. 10. – P. 1113-1117.
7. Patra J.C. Chakraborty G. Meher P.K. Neural-Network-Based Robust Linearization and Compensation Technique for Sensors Under Non-linear Environmental Influences // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2008. – Vol. 55, Issue 5. – P.1316-1327.
8. Мухатаев Н.А. Алгоритм линеаризации и температурной компенсации характеристик преобразователей // Матер. третьей научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». Т. 2. – Таганрог, ТТИ ЮФУ, 2008. – С. 74-76.
9. Клевцов С.И., Линьков В.С. Пространственная аппроксимация градуировочной характеристики датчика давления // Матер. международной научной конференции "Анализ и синтез как методы научного познания". Ч. 2. – Таганрог: Изд-во "Антон", ТРТУ, 2004. – С. 8-15.
10. Шапонич Д., Жигич А. Коррекция пьезорезистивного датчика давления с использованием микроконтроллера // Приборы и техника эксперимента. – 2001. – № 1. – С. 54-60.
11. Клевцов С.И. Пространственно-полиномиальные модели аппроксимации градуировочной характеристики интеллектуального датчика // Тр. международных научно-технических конференций "Интеллектуальные системы" (IEEE AIS'04) и "Интеллектуальные САПР" (CAD-2004): Научные издания в 3-х т. Т. 2. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 2004. – С. 309-314.
12. Клевцов С.И. Модели и методы построения прецизионных градуировочных характеристик интеллектуальных датчиков давления // Известия ТРТУ. – 2007. – № 3. – С. 110-118.
13. Клевцов С.И., Клевцова А.Б. Мульти сегментная пространственная модель градуировочной характеристики интеллектуального датчика // Матер. международной научной конференции "Цифровые методы и технологии". Ч. 4. – Таганрог: Изд-во "Антон", ТРТУ, 2005. – С. 21-26.
14. Пьявченко О.Н., Мокров Е.А., Панич А.Е., Клевцов С.И., Пьявченко А.О., Федоров А.Г., Удод Е.В. Методы, модели, алгоритмы и архитектура прецизионных интеллектуальных датчиков давления. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 130 с.
15. Клевцов С.И. Особенности применения моделей градуировочных характеристик датчиков давления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 1 (78). – С. 25-26.
16. Клевцов С.И., Удод Е.В. Пространственная плоскостная модель градуировочной характеристики интеллектуального датчика давления // Известия ТРТУ. – 2005. – № 1. – С. 99-107.
17. Пьявченко О.Н. Клевцов С.И. Повышение точности обработки результатов измерения в интеллектуальных датчиках-измерителях физических сигналов // Электроника и системы управления. – 2006. – № 1. – С. 16-21.
18. Семенов Л.А., Сирая Т.Н. Методы построения градуировочных характеристик средств измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1986.
19. Клевцов С.И. Мульти сегментная пространственная аппроксимация градуировочной характеристики микропроцессорного датчика // Метрология. – 2011. – № 7. – С. 26-36.
20. Klevtsov and Udod Y. Model of the Spatial Conversion Characteristics for Graduation of the Microprocessor-Based Sensor's with Indemnification of Influence Destabilizing Factors // in Proc. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2015. – P. 1-5. – Doi: 10.1109 / SIBCON.2015.7147097.

## REFERENCES

1. Hillea P., Höhlera R., Stracka H. A Linearisation and Compensation Method for Integrated Sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 1994, Vol. 44, Issue 2, pp. 95-102.
2. Bobrovnikov N.R., Yarkin S.V., Gridin Yu.N., Strygin V.D., Chertov E.D. Matematicheskoe obespechenie mikroprotsessornykh preobrazovateley analogovykh pnevmaticheskikh signalov [Mathematical support of microprocessor converters of analog pneumatic signals], *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics], 2002, No. 2, pp. 36-39.

3. Bartkovjak J., Karovičová M. Approximation by Rational Functions, *Measurement Science Review*, 2001, Vol. 1, No. 1, pp. 63-65.
4. Gutnikov V.S. Tendentsii razvitiya elektronnykh izmeritel'nykh preobrazovateley dlya datchikov [Trends in the development of electronic measuring transducers for sensors], *Pribory i sistemy upravleniya* [Instruments and control systems], 1990, No. 10, pp. 32-35.
5. Bluemm C., Weiss R., Weigel R., Brenk D. Correcting nonlinearity and temperature influence of sensors through B-spline modeling, *Industrial Electronics (ISIE). 2010. IEEE International Symposium. 4-7 July 2010*, pp. 3356-3361.
6. Gorbunov S.F., Tsylin B.V. Linearization of calibration characteristics of capacitance pressure sensors, *Measurement Techniques*, 2011, Vol. 53, No. 10, pp. 1113-1117.
7. Patra J.C., Chakraborty G., Meher P.K. Neural-Network-Based Robust Linearization and Compensation Technique for Sensors Under Non-linear Environmental Influences, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2008, Vol. 55, Issue 5, pp.1316-1327.
8. Mukhataev N.A. Algoritm linearizatsii i temperaturnoy kompensatsii kharakteristik preobrazovateley [The algorithm of linearization and temperature compensation of converter characteristics], *Mater. tret'ey nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Materials of the third scientific and practical conference "Perspective systems and management tasks"]. Vol. 2. Taganrog, TTI YuFU, 2008, pp. 74-76.
9. Klevtsov S.I., Lin'kov V.S. Prostranstvennaya approksimatsiya graduirovochnoy kharakteristiki datchika davleniya [Spatial approximation of the calibration characteristic of the pressure sensor], *Mater. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Analiz i sintez kak metody nauchnoy poznaniya»* [Materials of the international scientific conference "Analysis and synthesis as methods of scientific cognition"]. Part 2. Taganrog: Izd-vo "Anton", TRTU, 2004, pp. 8-15.
10. Shaponich D., Zhigich A. Korrektsiya p'ezorezistivnogo datchika davleniya s ispol'zovaniem mikrokontrollera [Correction of a piezoresistive pressure sensor using a microcontroller], *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and techniques of the experiment], 2001, No. 1, pp. 54-60.
11. Klevtsov S.I. Prostranstvenno-polinomial'nye modeli approksimatsii graduirovochnoy kharakteristiki intellektual'nogo datchika [Spatial-polynomial models of approximation of the calibration characteristic of an intelligent sensor] *Tr. mezhdunarodnykh nauchno-tekhnicheskikh konferentsiy "Intellektual'nye sistemy" (IEEE AIS'04) i "Intellektual'nye SAPR" (CAD-2004): Nauchnye izdaniya v 3-kh t. T. 2* [Proceedings of the international scientific and technical conferences "Intelligent Systems" (IEEE AIS '04) and "Intelligent CAD" (CAD-2004). Scientific publications in 3 vol. Vol. 2]. Moscow: Izd-vo fiziko-matematicheskoy literatury, 2004, pp. 309-314.
12. Klevtsov S.I. Modeli i metody postroeniya pretsizionnykh graduirovochnykh kharakteristik intellektual'nykh datchikov davleniya [Models and methods for constructing precision calibration characteristics of intelligent pressure sensors], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2007, No. 3, pp. 110-118.
13. Klevtsov S.I., Klevtsova A.B. Mul'tisegmentnaya prostranstvennaya model' graduirovochnoy kharakteristiki intellektual'nogo datchika [Multi-segment spatial model of the calibration characteristic of an intelligent sensor], *Mater. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "TSifrovye metody i tekhnologii" [Materials of the international scientific conference "Digital methods and technologies"]*. Part 4. Taganrog: Izd-vo "Anton", TRTU, 2005, pp. 21-26.
14. P'yavchenko O.N., Mokrov E.A., Panich A.E., Klevtsov S.I., P'yavchenko A.O., Fedorov A.G., Udod E.V. Metody, modeli, algoritmy i arkhitektura pretsizionnykh intellektual'nykh datchikov davleniya [Methods, models, algorithms and architecture of precision intelligent pressure sensors]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2007, 130 p.
15. Klevtsov S.I. Osobennosti primeneniya modeley graduirovochnykh kharakteristik datchikov davleniya [Features of application of models of calibration characteristics of pressure sensors], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 1 (78), pp. 25-26.
16. Klevtsov S.I., Udod E.V. Prostranstvennaya ploskostnaya model' graduirovochnoy kharakteristiki intellektual'nogo datchika davleniya [Spatial planar model of the calibration characteristic of an intelligent pressure sensor], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2005, No. 1, pp. 99-107.
17. P'yavchenko O.N., Klevtsov S.I. Povyshenie tochnosti obrabotki rezul'tatov izmereniya v intellektual'nykh datchikakh—izmeritelyakh fizicheskikh signalov [Improving the accuracy of processing measurement results in intelligent sensors-meters of physical signals], *Elektronika i sistemy upravleniya* [Electronics and control systems], 2006, No. 1, pp. 16-21.

18. *Semenov L.A., Siraya T.N. Metody postroeniya graduirovocnykh kharakteristik sredstv izmereniy [Methods for constructing calibration characteristics of measuring instruments]. Moscow: Izd-vo standartov, 1986.*
19. *Klevtsov S.I. Mul'tisegmentnaya prostranstvennaya approksimatsiya graduirovocnoy kharakteristiki mikroprotssornogo datchika [Multi-segment spatial approximation of the calibration characteristic of a microprocessor sensor], Metrologiya [Metrology], 2011, No. 7, pp. 26-36.*
20. *Klevtsov and Udod Y. Model of the Spatial Conversion Characteristics for Graduation of the Microprocessor-Based Sensor's with Indemnification of Influence Destabilizing Factors, in Proc. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2015, pp. 1-5. DOI: 10.1109 / SIBCON.2015.7147097.*

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Тютиков.

**Клевцов Сергей Иванович** – Южный федеральный университет; e-mail: sergkmps@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634328025; к.т.н.; доцент.

**Klevtsov Sergey Ivanovich** – Southern Federal University; e-mail: sergkmps@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634328025; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 539.3, 51-7, 519.6, 517.9, 53.082.5

DOI 10.18522/2311-3103-2021-4-73-87

**А.Г. Клово, А.А. Илюхин, Г.В. Куповых, И.А. Ляпунова**

### **ОБОБЩЕННЫЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ВНУТРЕННИМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ**

*При решении задач, связанных с исследованием прочностных свойств различных конструкций, часто используются некоторые наборы тригонометрических (синусы или косинусы), а также гиперболических функций, которые циклично при взятии производных последовательно переходят друг в друга. Эти наборы состоят из двух функций, причем последняя из этих функций при дифференцировании переходит в первую, взятую соответственно со знаком «плюс» (тригонометрическая система первого типа) или «минус» (тригонометрическая система второго типа). Тригонометрические и гиперболические функции также используются при решении многих прикладных задач, математические модели которых содержат вторые производные по пространственным переменным. Если математическая модель содержит производные четвертого порядка по пространственным переменным, то при решении соответствующих задач можно использовать функции, четвертые производные которых пропорциональны этим функциям. Известен ряд работ по общей теории систем функций, где описаны обобщенные тригонометрические системы (ОТС) функций, производные определенного порядка которых пропорциональны этим функциям. В данной работе эта теория развивается в направлении исследования квадратичных форм функций, составляющих ОТС. Показано, что квадратичные формы функций ОТС могут сами по себе являться функциями ОТС того же порядка (первого или второго типов). Полученные тождества и созданная теория используется для решения спектральных задач для оператора четвертого порядка для функций с определенными условиями. Специфика рассматриваемых задач заключается в том, что помимо стандартных граничных условий имеются дополнительные условия на внутренней границе. Эти условия недостаточны для того, чтобы автономно решать задачу в каждой отдельной области в которых заданы исследуемые функции. Использование установленных в работе свойств ОТС позволяет решать такие задачи во всей рассматриваемой области.*

*Дифференциальный оператор; спектр; обобщенные тригонометрические системы; внутренняя граница; собственные функции; собственные значения; самосопряженность; ортонормированность.*