

УДК 519.65

## Мультисегментная пространственная аппроксимация градуировочной характеристики для прецизионных вычислений давления в интеллектуальных датчиках

С.И. Клевцов

Технологический институт Южного Федерального университета  
kafmps@tpark.ru

### Abstract

*Klevcov S.I. Multi-Segment Spatial Approximations of the Transmission Feature for Exact Calculation of Pressure in Intellectual Sensors. A method for multi-segment spatial approximation of the transmission feature of a sensor with linear and nonlinear elements has been developed to perform the exact measurements of pressure.*

Повышение точности и достоверности определения значений физических величин представляет собой одну из важных задач совершенствования математических и алгоритмических методов обработки результатов измерений в интеллектуальных датчиках. Ее решение во многом определяет степень надежности и безопасности функционирования сложных технических объектов и промышленных производств.

Достижение низкой погрешности измерения физической величины в интеллектуальном датчике базируется на использовании модели его градуировочной характеристики, адаптированной к особенностям поведения функции преобразования чувствительного элемента.

В отличие от аналогового датчика, для которого необходима линеаризация градуировочной характеристики, для интеллектуального датчика важно построить такую модель градуировочной характеристики, линейную или нелинейную, которая бы повторяла пространственную форму реальной характеристики настолько точно, насколько это необходимо, исходя из потребностей решаемых датчиком задач. Таким образом, формирование градуировочной характеристики интеллектуального датчика давления связано с решением задачи построения ее пространственной аппроксимации, удовлетворяющей заданным требованиям, основными из которых являются требования по точности во всем диапазоне измеряемого физического сигнала и внешних воздействующих факторов, а также требования к допустимому уровню сложности вычислений.

Для обработки сигналов, поступающих с чувствительного элемента, в интеллектуальном датчике давления используются различные модели его градуировочной характеристики, которые базируются на пространственном представлении функции преобразования чувствительного элемента [1-7]. Характерным для этих моделей является использование единого представления градуировочной характеристики для всей области изменения полезного сигнала и внешних факто-

ров (области определения градуировочной характеристики).

Наиболее простой моделью градуировочной характеристики датчика, широко используемой для градуировки аналогового датчика, является кусочно-линейная пространственная аппроксимация [1, 2, 3].

Применение кусочно-линейной аппроксимации для построения градуировочной характеристики интеллектуального датчика 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 [1] был выбран массив, содержащий 51 идентификационную точку поверхности  $Z=f(P,T)$ . Число калибровочных точек по оси  $P$  выбрано равным 17, а по оси  $T$  составляет три точки:  $T_{\min}$ ,  $T_{\text{ср}}$ ,  $T_{\max}$ . В качестве калибровочной ординаты выбран код  $Z$  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  $10^0\text{C}$ ).

Тем не менее, несмотря на существенное снижение погрешности вычисления давления, необходимо отметить, что при проведении измерений в диапазоне температур от  $-40^0\text{C}$  до  $+80^0\text{C}$  с  $T_{\text{ср}}=20^0\text{C}$  температурная составляющая погрешности на границах указанного диапазона может составить величину порядка 0,6%, что не позволяет рекомендовать данный метод для прецизионных вычислений. Тем не менее, его использование целесообразно и оправдано, когда к дат-

чику не пред'являються підвищені вимоги по точності.

В роботі [3] модель градуировочной характеристики представляє собою набір плоскостей, побудованих на основі пересікаючихся в просторі  $P \times U_P \times U_T$  прямих.

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 градуировочную поверхность плоскостями на каждом участке  $D_{n,m}$ . Зафиксируем на участке  $D_{n,m}$  средние значения переменных  $U_{Pcp,n}$  и  $U_{Tcp,m}$

$$U_{Pcp,n} = U_{P1,n} + (U_{P2,n} - U_{P1,n}) / 2,$$

$$U_{Tcp,m} = U_{T1,m} + (U_{T2,m} - U_{T1,m}) / 2,$$

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 прямих  $P'_{1,n,m}(U_T) \in P_{1,n,m}$  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 прямих  $P''_{1,n,m}(U_T)$  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.

Построение плоскости по двум пересекающимся прямым  $P''_{1,n,m}(U_T)$  и  $P''_{2,n,m}(U_P)$  не представляет труда. Таким образом, при аппроксимации указанным способом формируется система плоскостей, покрывающая всю поверхность градуировочной 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.

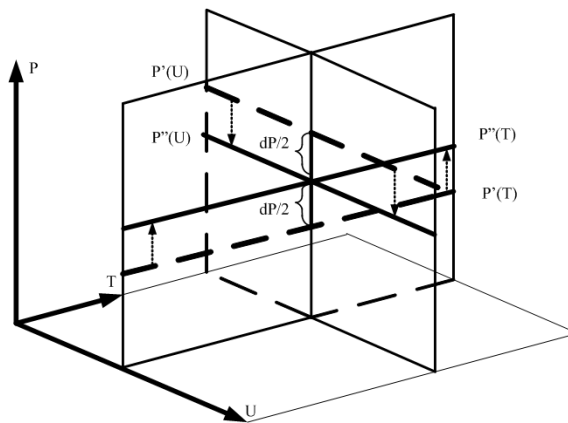


Рисунок 1 – Схема формирования пересекающихся прямих

Модифицированный алгоритм линеаризации градуировочной характеристики и температурной компенсации при вычислении давления предложен в работе [3].

В основе алгоритма лежит определение зависимости кода выходного параметра  $R_{код}$ , 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.

Как утверждает автор [3], результаты обработки реального изделия с использованием микроконтроллера MSP430 с аппаратным множителем показали, что алгоритм способен обеспечить погрешность не более  $\pm 1$  значащего разряда при 12-разрядном АЦП. Также отмечается высокая скорость реализации алгоритма.

Для проведения точных измерений также в настоящее время для аппроксимации градуировочной характеристики широко используются полиномы. Давление представляется полиномиальной функцией электрического сигнала, снимаемого с измерительного канала давления аналоговой части датчика [4, 5, 6, 7].

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

В работе [5] показано, что компенсация характеристик пьезорезисторного кремниевого 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, следует отметить, что указанный результат был достигнут при использовании довольно значительного массива исходных данных, примерно 10000 точек, что неприемлемо даже при производстве небольшой партии датчиков.

Задача достижения прецизионной точности измерения значения физической величины в интеллектуальном датчике может быть решена при использовании метода мультисегментной аппроксимации градуировочной характеристики (МСА ГХ) на основе моделей линейных или нелинейных пространственных элементов [7-11].

В этом случае можно говорить о построении пространственной градуировочной поверхности интеллектуального датчика.

В рамках предлагаемого метода реальная градуировочная характеристика заменяется системой локальных поверхностей так, чтобы они в совокупности повторяли ее пространственную конфигурацию. Тип аппроксимирующей локальной поверхности определяется многими факторами, такими как, например, точностные характеристики, объем и полнота исходных данных, требуемая скорость вычислений и другими.

В основе метода лежат следующие основные положения [6, 8, 9, 10]:

Модель пространственной градуировочной характеристики должна быть максимально адаптирована к особенностям конфигурации функции преобразования чувствительного элемента, фактически повторяя ее пространственную форму с учетом нелинейности, дрейфа нуля, влияния внешних факторов, например, темпера-

туры, преобразований сигналов в аналоговом интерфейсе датчика.

Пространственная аппроксимация градуировочной характеристики датчика должна удовлетворять заданным требованиям, основными из которых являются достижения заданной погрешности аппроксимации во всех диапазонах измерения физической величины и изменения внешних воздействующих факторов, а также требования к допустимому уровню сложности вычислений. Погрешность аппроксимации пространственной градуировочной характеристики может корректироваться в зависимости от решаемых датчиком задач.

Пространственная аппроксимация градуировочной характеристики представляет собой систему локальных линейных и (или) нелинейных пространственных элементов, - сегментов.

Функции, описывающие пространственную форму сегментов, могут быть различными и существенно отличаться по типу, например, часть сегментов описывается линейными выражениями, а часть – нелинейными (полиномом). Тип функциональной зависимости определяется многими факторами, такими как, достижение заданной погрешности аппроксимации, объем и полнота исходных данных, требуемая скорость вычислений и другими.

Задача сшивки сегментов на границе раздела их областей определения не ставится. Пространственная конфигурация краев сегментов на границах областей их определения должна обеспечивать достижение заданной погрешности аппроксимации градуировочной характеристики при выборе любого из сегментов в процессе проведения измерений.

В рамках предлагаемого метода мультисегментной аппроксимации в общем виде пространственная модель градуировочной характеристики датчика давления с учетом влияния температуры, как внешнего воздействующего фактора, представляется выражением:

$$P_t = P(U_{Pt}, U_{Tt}, \bar{\gamma}_{\alpha\beta}, \Omega_{\alpha\beta}, F_{\alpha\beta}, \varepsilon_P), \quad (1)$$

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  $\alpha\beta$ -го сегмента градуировочной характеристики,

$\alpha$  – номер интервала разбиения области изменения сигнала канала давления,  $\alpha = 1, \dots, L_P$ ;

$\beta$  – номер интервала разбиения области изменения сигнала канала температуры,  $\beta = 1, \dots, L_T$ ;

$L_{PT} = L_P \cdot L_T$  – общее количество сегментов и областей их определения;

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

$F_{\alpha\beta}$  – функция, аппроксимирующая  $\alpha\beta$ -й сегмент градуировочной характеристики датчика;

$\varepsilon_P$  – максимальная погрешность аппроксимации градуировочной характеристики в заданных диапазонах измеряемого фактора и изменения температуры.

Исходной информацией для построения пространственной градуировочной характеристики (ПГХ) датчика является информация о поведении пространственной функции преобразования чувствительного элемента (ЧЭ) при воздействии на него измеряемой физической величины и наиболее значимого внешнего дестабилизирующего фактора. Эта информация обычно представляется в виде массива данных об электрических сигналах давления и температуры, снимаемых с соответствующих выводов составного чувствительного элемента датчика при проведении градуировочных испытаний в требуемых диапазонах изменения давления и температуры. С учетом известного коэффициента усиления аналоговой части интеллектуального датчика эти данные нетрудно преобразовать к виду, необходимому для формирования ПГХ.

Учитывая особенности и ограничения рассматриваемого метода, можно сформулировать основные положения методики построения мультисегментной пространственной градуировочной характеристики датчика давления:

Имеется область определения ПГХ:

$$Q = Q_P \cup Q_T, Q_P = [P_{min}, P_{max}], \\ Q_T = [T_{min}, T_{max}],$$

где  $P_{min}, P_{max}$  – минимальное и максимальное эталонные значения давления, установленные при испытаниях датчика;

$T_{min}, T_{max}$  – минимальное и максимальное эталонные значения температуры, установленные при испытаниях датчика.

Имеется множество фиксированных значений эталонных давления и температуры, при которых проводятся тестовые замеры сигналов каналов давления и температуры датчика давления:

$$P = \{P_{\xi}\}_{\xi=1}^{\Psi}, P_{\xi} \in Q_P, \xi = 1 \dots \Psi, \\ T = \{T_s\}_{s=1}^S, T_s \in Q_T, s = 1 \dots S.$$

Шаг изменения давления и температуры, как правило, постоянный.

Каждой паре значений  $(P_{\xi}, T_s)$  ставятся в соответствие множество значений сигналов каналов давления и температуры датчика давления:

$$U^{\xi s} = \{U_{P_r}^{\xi s}, U_{T_r}^{\xi s}\}_{r=1}^R,$$

где  $U_{P_r}^{\xi s}, U_{T_r}^{\xi s}$  –  $r$ -е значения сигналов каналов давления и температуры при установлении эталонных значений  $P_{\xi}$  и температуры  $T_s$  на испытательном стенде;

$R$  – количество испытаний при заданных  $P_{\xi}$  и  $T_s$ .

Таким образом, имеется множество экспериментальных точек  $\{M_n(P_n, U_{P_n}, U_{T_n})\}_{n=1}^N$ , на основе которых строится аппроксимация пространственной функции преобразования ( $N$  – общее количество экспериментальных точек).

Модель пространственной градуировочной характеристики (1) строится в виде системы из  $L_{PT}$  локальных поверхностей или сегментов  $\{P_{UT}^{\alpha\beta}\}_{\alpha=1, \beta=1}^{L_P, L_T}$ , каждая из которых может описываться своей функцией:

$$P_t = F_{\alpha\beta}(U_{P_t}, U_{T_t}). \quad (2)$$

Функция  $F_{\alpha\beta}(U_{P_t}, U_{T_t})$  определяет сегмент  $P_{UT}^{\alpha\beta}$  пространственной градуировочной характеристики на области определения  $\Omega_{\alpha\beta}$ . Для построения функции используется подмножество экспериментальных точек

$\{M_k(P_k, U_{Pk}, U_{Tk})\}_{k=1}^{N_{\alpha\beta}} \in \Omega_{\alpha\beta}$ , где  $N_{\alpha\beta}$  - количество экспериментальных точек, принадлежащих области определения  $\Omega_{\alpha\beta}$  сегмента  $\Pi_{UT}^{\alpha\beta}$ .

Сегменты градуировочной характеристики могут не сшиваться на границах их областей определения, то есть  $F_{\alpha-1,\beta}(U_{Pt} = U_{\alpha-1}, U_{Tt}) \neq F_{\alpha,\beta}(U_{Pt} = U_{\alpha-1}, U_{Tt})$

Такая схема стыковки сегментов снимает неопределенность при принятии решения о принадлежности измеряемых сигналов каналов давления ( $U_{Pt}$ ) и температуры ( $U_{Tt}$ ) к той или другой области определения, если значения этих сигналов формально принадлежат границе этих областей.  $U_{Pt}, U_{Tt} \in \Omega_{\alpha-1,\beta}$  и  $U_{Pt}, U_{Tt} \in \Omega_{\alpha,\beta}$ . При этом обеспечивается погрешность аппроксимации градуировочной характеристики не ниже  $\varepsilon_P$ .

Построенная таким образом система локальных пространственных элементов является аппроксимацией экспериментальной пространственной градуировочной характеристики интеллектуального датчика.

Базовые зависимости (2), используемые для построения локальных элементов пространственной функции преобразования датчика в виде плоскости или поверхности, могут быть различными.

Аппроксимация градуировочной характеристики посредством ее представления в виде системы сегментов, каждый из которых является линейным пространственным элементом (ЛПЭ) в пространстве измеряемых параметров позволяет предельно упростить вычисления в микроконтроллере [7, 9, 11].

Однако, если требуется более высокая точность вычислений, чем обеспечивает подход на основе ЛПЭ, то в качестве элементов мульти-сегментной модели целесообразно использовать нелинейные пространственные элементы (НПЭ) [8, 9, 12].

Наиболее приемлемыми моделями элементарного аппроксимирующего элемента являются [7, 8, 9, 11, 12]:

Модель элементарной аппроксимирующей плоскости в виде:

$$P = A_{\alpha\beta} + B_{1\alpha\beta} \cdot U_{Pt} + B_{2\alpha\beta} \cdot U_{Tt}, \quad (3)$$

где  $A_{\alpha\beta}, B_{1\alpha\beta}, B_{2\alpha\beta}$  - коэффициенты аппроксимации для представления сегмента  $\Pi_{UT}^{\alpha\beta}$  в его области определения  $\Omega_{\alpha\beta}$  в виде ЛПЭ.

Модель элементарной аппроксимирующей поверхности в виде полинома второй или третьей степени:

$$P = \sum_{i=0}^I a_i^{\alpha\beta} \cdot U_{Pt}^i, I = 2, 3 \quad (4)$$

$$a_i^{\alpha\beta} = \sum_{l=0}^L \gamma_{il}^{\alpha\beta} \cdot U_{Tt}^l, L = 2, 3 \quad (5)$$

где  $a_i^{\alpha\beta}$  и  $\gamma_{il}^{\alpha\beta}$  - коэффициенты аппроксимации для представления сегмента  $\Pi_{UT}^{\alpha\beta}$  в его области определения  $\Omega_{\alpha\beta}$  в виде НПЭ, причем коэффициенты аппроксимации  $a_i^{\alpha\beta}$  зависят только от температуры  $T$ , 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 сигналов канала давления и канала температуры датчика в текущий момент времени  $t$ .

Выражение (4) учитывает нелинейность пространственной градуировочной характеристики при фиксированном  $T$ , а выражение (5) характеризует ее нелинейность при изменении температуры.

Коэффициенты аппроксимации (3) или (5) определяются с помощью метода наименьших квадратов для каждого сегмента  $\Pi_{UT}^{\alpha\beta}$  [13]. При этом используются экспериментальные точки, принадлежащие области определения сегмента  $\{M_k(P_k, U_{Pk}, U_{Tk})\}_{k=1}^{N_{\alpha\beta}} \in \Omega_{\alpha\beta}$ .

Использование метода мульти-сегментной аппроксимации градуировочной характеристики на основе моделей линейных или нелинейных пространственных элементов для вычислений значений давления с компенсацией температурной погрешности осуществляется следующим образом:

Исходными физическими сигналами, действующими на чувствительный элемент датчика, являются давление  $P_k$  и температура  $T_k$ . Им соответствуют значения электрических сигналов канала давления  $U_{Pk}$  и канала температуры  $U_{Tk}$ .

По известным значениям электрических сигналов  $U_{Pk}$  и  $U_{Tk}$  находится область определения сегмента пространственной градуировочной характеристики. Сначала 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  $\Omega_{\alpha\beta}$  выбираются заранее рассчитанные коэффициенты аппроксимации.

Вычисляется давление с использованием выражения (3) или (4), используя выбранные коэффициенты аппроксимации.

Проверка эффективности использования моделей пространственной градуировочной характеристики для достижения высокой точности измерения давления 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.

Испытания проводились по следующей схеме:

- температура изменялась в установленном диапазоне с заданным шагом;
- при каждом фиксированном значении температуры давление изменялось от нижнего значения до верхнего предела и обратно с заданным шагом;
- на каждом шаге изменения давления проводились измерения выходных сигналов каналов давления и температуры.

Представленные данные испытаний характеризуются небольшой нелинейностью при фиксированной температуре. Нелинейность наблюдается на начальном и конечном участках диапазона изменения давления.

Зависимость сигнала ЧЭ от температуры более значительная и также имеет нелинейный характер.

При низких температурах наблюдается увеличение сигнала при росте температуры, при высоких температурах динамика изменения сигнала иная, – при росте температуры сигнал уменьшается.

Кроме того, реальная функция преобразования ЧЭ представляет поверхность в системе параметров  $P \times U_p \times U_T$ , которая имеет особенность, – нижняя и верхняя части поверхности (по оси давления) повернуты друг относительно друга с условной линией раздела, например, для ЧЭ № 2 при  $P \sim 360-380$  КПа.

Пространственная градуировочная характеристика для ИДД с ЧЭ №1 формировалась на основе ЛПЭ размерами 6 кгс/см<sup>2</sup>  $\times$  20<sup>0</sup>С, НПЭ – 12 кгс/см<sup>2</sup>  $\times$  40<sup>0</sup>С. Для ИДД с ЧЭ №2 размеры ЛПЭ были выбраны 1 кгс/см<sup>2</sup>  $\times$  20<sup>0</sup>С, а НПЭ – 2 кгс/см<sup>2</sup>  $\times$  40<sup>0</sup>С. Размеры пространственных эле-

ментов были выбраны наименьшими из возможных при имеющемся объеме испытаний.

На рис. 2, 3 представлены графики относительной погрешности аппроксимации градуировочной характеристики ЧЭ №1 с использованием линейного и нелинейного пространственных элементов при температурах  $T = -40^{\circ}\text{C}$  и  $T = 80^{\circ}\text{C}$ .

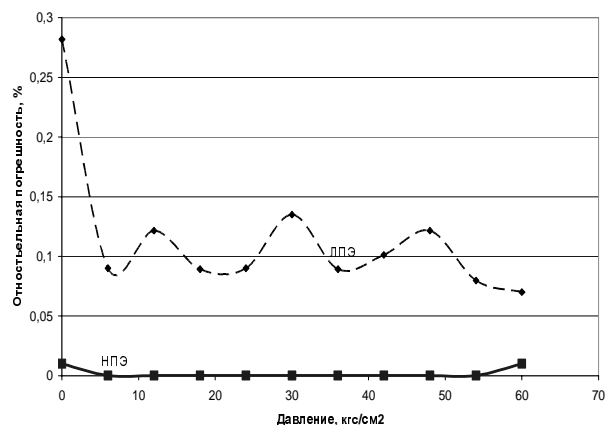


Рисунок 2 – График относительной погрешности аппроксимации градуировочной характеристики ЧЭ №1 при  $T = -40^{\circ}\text{C}$  (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

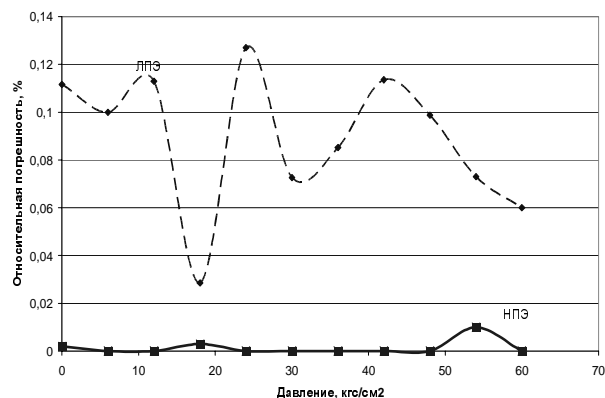


Рисунок 3 – График относительной погрешности аппроксимации градуировочной характеристики ЧЭ №1 при  $T = 80^{\circ}\text{C}$  (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

На рис. 4, 5 представлены аналогичные графики относительной погрешности аппроксимации градуировочной характеристики для ЧЭ №2.

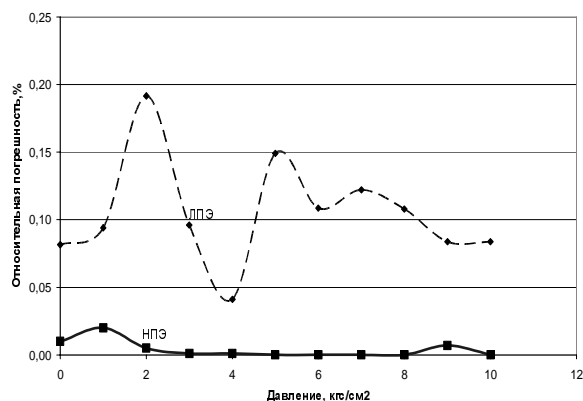


Рисунок 4 – График относительной погрешности аппроксимации градуировочной характеристики ЧЭ №2 при  $T = -40^{\circ}\text{C}$  (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

Анализ результатов моделирования показывает, что наилучшие результаты при формировании модели пространственной градуировочной характеристики получены в случае использования нелинейных пространственных элементов [14].

Например, относительная погрешность аппроксимации градуировочной характеристики с использованием НПЭ на подобласти размером  $2 \text{ кгс/см}^2 \times 40^{\circ}\text{C}$  для ЧЭ № 2 не выше 0,03% в диа-

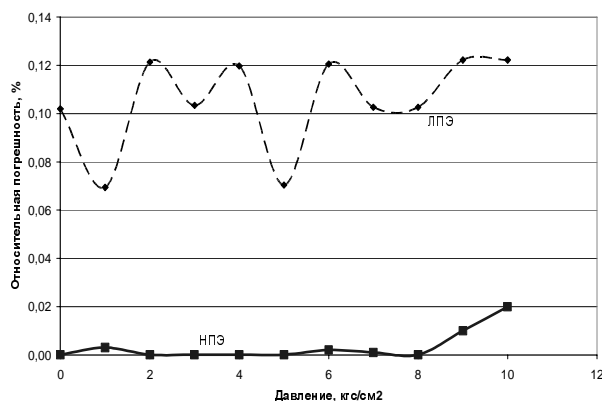


Рисунок 5 – График относительной погрешности аппроксимации градуировочной характеристики ЧЭ №2 при  $T = 80^{\circ}\text{C}$  (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

пазоне изменения давления от 0 кгс/см<sup>2</sup> до 10 кгс/см<sup>2</sup> и температур от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $80^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, при высоких точностных характеристиках ЧЭ, использование метода мультисегментных пространственных градуировочных характеристик в ИДД может обеспечить прецизионную точность измерения значений давления в широком диапазоне изменения давлений и температур.

### Литература

1. 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.
2. Мухатаев Н.А. Алгоритм линеаризации и температурной компенсации характеристик преобразователей.//Материалы третьей научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» – Том 2 – Таганрог, ТТИ ЮФУ. – 2008. – С. 74 – 76.
3. Клевцов С.И., Линьков В.С. Пространственная аппроксимация градуировочной характеристики датчика давления.//Материалы международной научной конференции "Анализ и синтез как методы научного познания". Ч. 2. - Таганрог: Изд-во "Антон", ТРТУ, 2004. - С.8-15.
4. Клевцов С.И., Линьков В.С., Веретельников Ю.А., Кузьминов В.Г. Погрешности вычисления давления в интеллектуальном датчике при матрично-полиномиальной аппроксимации его градуировочной характеристики// Известия ТРТУ. 2004. №2. – С.30-48.
5. Шапонич Д., Жигич А. Коррекция пьезорезистивного датчика давления с использованием микроконтроллера.//Приборы и техника эксперимента. - 2001. - №1. – С. 54-60.
6. Клевцов С.И. Пространственно-полиномиальные модели аппроксимации градуировочной характеристики интеллектуального датчика.// Труды международных научно-технических конференций "Интеллектуальные системы" (IEEE AIS'04) и "Интеллектуальные САПР" (CAD-2004). Научные издания в 3-х томах. М.: Изд-во физико-математической литературы, 2004, Т.2. 468с. - С.309-314
7. Клевцов С.И. Модели и методы построения прецизионных градуировочных характеристик интеллектуальных датчиков давления.// Известия ТРТУ. 2007. №3. – С.110-118.
8. Клевцов С.И., Клевцова А.Б. Мультисегментная пространственная модель градуировочной характеристики интеллектуального датчика. //Материалы международной научной конференции "Цифровые методы и технологии". Ч.4. -Таганрог: Изд-во "Антон", ТРТУ, 2005. – С.21-26.

9. 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. – 130с.
10. Клевцов С.И. Особенности применения моделей градуировочных характеристик датчиков давления.// Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. №1 (78). - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ. - С.25–26.
11. Клевцов С.И., Удод Е.В. Пространственная плоскостная модель градуировочной характеристики интеллектуального датчика давления.// Известия ТРТУ. 2005. №1. – С.99-107.
12. Пьявченко О.Н. Клевцов С.И. Повышение точности обработки результатов измерения в интеллектуальных датчиках–измерителях физических сигналов.// Электроника и системы управления. Киев. – 2006. – №1. – С.16–21.
13. Семенов Л.А., Сирая Т.Н. Методы построения градуировочных характеристик средств измерений. — М.: Изд-во стандартов, 1986.
14. Клевцов С.И., Удод Е.В. Компьютерное моделирование решения задач компенсации составляющих систематической погрешности датчика давления в целочисленной арифметике.// Известия ТРТУ. 2006. №5. – С.103-109.

*Поступила в редакцию 05.03.10*