

**Ауси Рим Мохаммед Худхейр** – Южный федеральный университет; e-mail: ausi@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра систем автоматического управления; аспирант.

**Заргарян Елена Валерьевна** – e-mail: ezargaryan@sfedu.ru; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

**Заргарян Юрий Артурович** – e-mail: yazargaryan@sfedu.ru; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

**Aussi Rim Mohammed Hedhair** – Southern Federal University; e-mail: ausi@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the department of automatic control systems; postgraduate student.

**Zargaryan Elena Valerevna** – e-mail: ezargaryan@sfedu.ru; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Zargaryan Yuri Arturovich** – e-mail: yazargaryan@sfedu.ru; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.2.089

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-222-234

**С.И. Клевцов**

### **ВЫБОР МОДЕЛИ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАТЧИКА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЬЮ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН**

*На примере датчика давления рассматривается проблема подбора модели и параметров функции преобразования микропроцессорного датчика. Функция преобразования базируется на математической модели, которая ставит в соответствие электрическому сигналу, поступающему с измерительного преобразователя датчика, значение физической величины. Модель функции преобразования микропроцессорного датчика должна повторять реальную пространственную зависимость электрического сигнала от измеряемой величины и учитывать влияние дестабилизирующих факторов, таких как температура. Микропроцессорные датчики используют для измерения параметров объекта с заданной точностью. Основной вклад в погрешность измерений вносит неточность аппроксимации реальной функции преобразования ее моделью. Необходимость достижения оптимального уровня погрешности измерения параметра в системе с учетом сложности и стоимости измерений требует управления погрешностью датчика. С этой целью представлены различные модели и методы аппроксимации. Для эффективного управления погрешностью предлагается метод мультисегментной пространственной аппроксимации, в основе которого лежат модели линейных или нелинейных пространственных элементов. Сформулирована процедура управления погрешностью. Порядок использования модели мультисегментной пространственной аппроксимации характеристики преобразования для вычислений давления с учетом влияния температуры основан на комбинированном применении линейных и нелинейных пространственных элементов в рамках одной модели. 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. Метод позволяет изменять типы и конфигурацию пространственных элементов и таким способом влиять на погрешность измерений. Преимущества данного подхода подтверждаются результатами моделирования.*

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

S.I. Klevtsov

**SELECTION OF THE SENSOR CONVERSION CHARACTERISTIC MODEL FOR CONTROLLING THE ERROR IN THE MEASUREMENT OF PHYSICAL QUANTITIES**

*On the example of a pressure sensor, the problem of selecting a model and parameters of the conversion function of a microprocessor sensor is considered. The conversion function is based on a mathematical model that associates the electrical signal coming from the sensor's measuring transducer with the value of a physical quantity. The model of the conversion function of a microprocessor sensor must repeat the real spatial dependence of the electrical signal on the measured value and take into account the influence of external factors, such as temperature. Microprocessor sensors are used to measure the parameters of an object with a given accuracy. The main contribution to the measurement error is made by the inaccuracy of the approximation of the real transformation function by its model. The need to achieve the optimal level of parameter measurement error in the system, taking into account the complexity and cost of measurements, requires the control of the sensor error. For this purpose, various models and methods of approximation are presented. For efficient error control, a method of multi-segment spatial approximation based on models of linear or non-linear spatial elements is proposed. The error control procedure is formulated. The procedure for using the model of multi-segment spatial approximation of the transformation characteristic for pressure calculations taking into account the influence of temperature is based on the combined use of linear and non-linear spatial elements within the same model. The segment type selection procedure should begin with an assessment of the possibility of using a linear spatial element first, and if it is impossible to meet the accuracy requirements, an analysis of the use of a non-linear element. The method allows you to change the types and configuration of spatial elements and in this way influence the measurement error. The advantages of this approach are confirmed by the simulation results.*

*Model; microprocessor sensor; conversion function; error; approximation.*

**Введение.** Увеличение точности и достоверности вычисления измеряемых значений является одной из важных задач разработки методов обработки результатов измерений в микропроцессорных датчиках физических величин. От точности измерений зависит возможность обеспечения эффективного мониторинга работы различных технических объектов, их надежность и безопасность. В микропроцессорном датчике реализуется такой вид характеристики преобразования, которая в максимальной степени повторяет форму функции преобразования сенсора или первичного преобразователя датчика [1, 2]. Важно также, чтобы характеристика преобразования учитывала поведение функции преобразования датчика в случае влияния внешних факторов [1].

Обычно для аналогового датчика формируют характеристику преобразования в виде линейной функции. Реализуется это с помощью конструкционных и схемотехнических методов [1, 2]. Микропроцессорный 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.

При построении модели характеристики преобразования микропроцессорного датчика медленно меняющихся физических величин, например, давления, учитываются различные технические требования. Одними из основных требований являются требования к точности аппроксимации модели. Помимо этого, необходимо обеспечить заданную погрешность в рамках всего диапазона изменения физического сигнала и действующих факторов, реализовать вычисления с низким уровнем сложности, чтобы можно было выполнять вычисления в контроллере в «фоновом режиме» [3, 4].

Точность измерений, выполняемых микропроцессорным 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.

**Анализ моделей характеристики преобразования датчика.** Измерение физических величин, таких как давление осуществляется в микропроцессорных датчиках с использованием различных моделей характеристик преобразования. Как правило, в основу этих моделей положено пространственное представление о функции преобразования сенсора. Характеристика преобразования связывает измеряемую физическую величину, электрический сигнал с канала измерения физической величины и электрический сигнал с канала измерения внешнего фактора. Также постулируется, что модель не меняет свое представление во всей области определения, то есть области определения измеряемого сигнала и воздействующего фактора [1–10].

Наиболее простой моделью характеристики преобразования является кусочно-линейная аппроксимация [1, 2, 6, 8]. Она используется в тех случаях, когда реальная функция преобразования сенсора характеризуется незначительной нелинейностью, а требования к точности измерений невысокие.

Для построения модели требуется формирование массива идентификационных точек, которые используются для аппроксимации. Их количество определяется заданной точностью аппроксимации. В работе [2], чтобы получить приведенную относительную погрешность 0,5%, сформировали массив идентификационных точек из 51 значения. Массив охватывает всю область определения характеристики преобразования. По оси давления было выбрано 17 точек для каждого значения температуры, как воздействующего фактора. Область изменения температуры разделена на три зоны, для каждой из которых определена идентификационная точка. Для ускорения работы алгоритма аппроксимации ордината калибровочной точки определяется кодом 12-разрядного АЦП.

Нелинейность функции преобразования в результате использования модели снизилась с 5% до 0,05%. Погрешность, связанная с влиянием температуры, на каждые  $10^0\text{C}$  уменьшилась с 2,5% до 0,1% [2].

Датчик давления калибровался при температуре  $T_{\text{ср}}=20^0\text{C}$ . Тогда только составляющая погрешности, связанная с влиянием температуры, на границах диапазона изменения температур от  $-40^0\text{C}$  до  $+80^0\text{C}$  составит величину порядка 0,6%, что не позволяет использовать датчик для высокоточных измерений [2]. Но если к датчику не предъявляются высокие требования к точности, использование данной модели оправдано [7].

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  $U_P$  на  $k$  равных частей и по оси  $U_T$  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  $U_{Pcp,n}$  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 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.

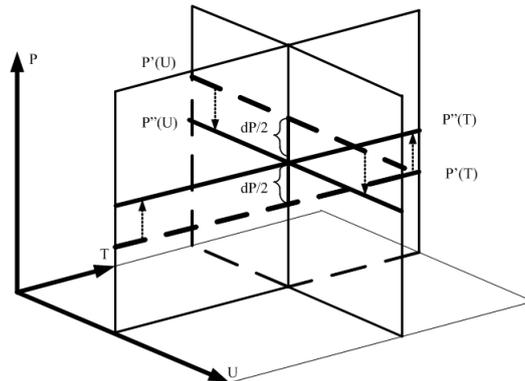


Рис. 1. Схема формирования пересекающихся прямых

Построение плоскости по двум пересекающимся прямым  $P''_{1,n,m}(U_T)$  и  $P''_{2,n,m}(U_P)$  осуществляется методами линейной алгебры. В результате получаем характеристику преобразования, представляющую совокупность плоскостей, аппроксимирующих реальную функцию преобразования датчика. Следует отметить, что на границах построенных плоскостей есть зоны, где не определена характеристика преобразования датчика. Это требует дополнительных вычислений, что приводит к увеличению погрешности аппроксимации.

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 реализации модели характеристики преобразования часто применяются полиномиальные функции.

Электрический сигнал, который снимается с измерительного канала давления, представляется в виде полинома первой или второй степени. В матричном виде соотношения, определяющие модель, выглядят следующим образом [10, 11, 12, 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 реализации модели характеристики преобразования необходимо определение коэффициентов  $\gamma_{ij}$ . Модель позволяет вычислять значения давления  $P$  для любых значений пары электрических сигналов с канала температуры и канала давления. Таким образом, формируется единая модель характеристики преобразования для всего диапазона изменения сигнала с канала давления и канала температуры [10].

В работе [10] была рассмотрена модель характеристики преобразования как аппроксимации обратной функции преобразования пьезорезисторного кремнивого сенсора датчика давления. Использовалась аппроксимация в виде полиномиальной функции второго порядка относительно давления и температуры. Модель обеспечила снижение предельной погрешности измерений до  $\pm 0,2\%$  за счет учета нелинейности реальной функции преобразования. В диапазоне температур от 0 до 70°C температурная погрешность снизилась до  $\pm 0,1\%$ . Но для достижения этих результатов пришлось сформировать массив исходных данных не менее 10000 точек. Однако, при серийном производстве датчиков такой объем градуировочных испытаний практически невозможно реализовать.

**Управление погрешностью аппроксимации при выборе конфигурации пространственной модели характеристики преобразования датчика.** Для управления погрешностью аппроксимации характеристики преобразования датчика можно воспользоваться методом мультисегментной пространственной аппроксимации (МСПА ХП).

В качестве отдельных элементов аппроксимирующей поверхности, моделирующей характеристику преобразования датчика, в методе применяются линейные и нелинейные пространственные элементы [13–20]. Таким образом, реальная характеристика преобразования сенсора заменяется системой локальных поверхностей [11]. Форма реальной характеристики преобразования в этом случае имитируется локальными пространственными элементами. Выбирая для определенного участка области определения характеристики преобразования вид сегмента, его конфигурацию и параметры, можно управлять погрешностью аппроксимации характеристики.

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

Модель пространственной характеристики преобразования должна повторять конфигурацию функции преобразования сенсора датчика с учетом влияния внешних и внутренних факторов, таких как температура, нелинейность, дрейф нуля [19].

Должна быть обеспечена заданная погрешность аппроксимации характеристики преобразования датчика, соответствующая требованиям решаемой задачи измерения физической величины во всем диапазоне ее изменения и изменения внешнего влияющего фактора. При этом учитывается сложность вычислений.

Модель характеристики преобразования базируется на пространственной аппроксимации характеристики преобразования, которая представляет собой систему локальных линейных или нелинейных пространственных элементов (сегментов). Также возможно применение нелинейных и линейных элементов одновременно в одной модели характеристики преобразования исходя из особенностей реальной функции преобразования сенсора датчика.

Пространственные элементы модели характеристики преобразования датчика на границе раздела их областей определения могут не сшиваться. Более того, они могут перекрываться (рис. 2). Таким образом достигается большая свобода в выборе элементов для аппроксимации без снижения точности. Необходимо лишь обеспечить заданную погрешность аппроксимации характеристики преобразования на границе раздела областей определения сегментов. Причем достаточно, чтобы точность измерений была обеспечена использованием только одного из пространственных элементов.

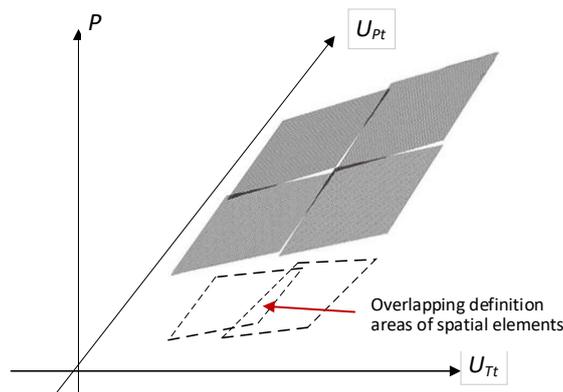


Рис. 2. Схема перекрытия пространственных элементов, аппроксимирующих характеристику преобразования

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 микропроцессорного датчика (далее, канал давления датчика) в момент времени  $t$ ;  $U_{Tt}$  – значение электрического сигнала, снимаемого с измерительного канала температуры аналоговой части микропроцессорного 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 характеристики,  $\alpha$  – номер интервала разбиения зоны изменения сигнала канала давления,  $\alpha = 1, \dots, L_P$ ;  $\beta$  – номер интервала разбиения зоны изменения сигнала канала температуры,  $\beta = 1, \dots, L_T$ ;  $L_{PT}$  – 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  $\alpha\beta$ -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  $\bar{U}_{T\beta}$ ;  $\bar{Y}_{\alpha\beta}$  – массив значений коэффициентов аппроксимации  $\alpha\beta$ -го сегмента характеристики;  $F_{\alpha\beta}$  – функция, аппроксимирующая  $\alpha\beta$ -й сегмент характеристики датчика;  $\varepsilon_P$  – максимальная погрешность аппроксимации характеристики преобразования.

Для построения МСПА ХП датчика используются данные, которые формируются на основе градуировочных испытаний [19]. При фиксированной температуре на датчик подается давление с заданным шагом с изменением от наименьшей границы диапазона к наибольшей и обратно. Проводится несколько циклов испытаний. Затем меняется температура среды и процесс повторяется. В результате после предварительной обработки имеется массив значений сигналов с каналов давления и температуры, который характеризует поведение датчика при воздействии измеряемой величины с учетом влияния внешнего фактора.

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

Использование линейных пространственных элементов (ЛПЭ) в качестве сегментов целесообразно, если требуется получить приемлемую точность аппроксимации характеристики преобразования при низкой сложности вычислений в микроконтроллере [13, 16, 19, 20].

Для достижения высокой точности вычислений физической величины в качестве элементов модели характеристики преобразования целесообразно использовать нелинейные пространственные элементы (НПЭ) [13, 19, 20].

Возможна комбинация ЛПЭ и НПЭ при построении МСПА ХП, когда в области определения характеристики преобразования можно выделить подобласти, которые обладают более низкой нелинейностью по сравнению с другими.

Наиболее приемлемыми моделями сегментов являются полиномы первой, второй и третьей степени [13, 16, 18, 19, 20].

Модель аппроксимирующей плоскости в виде полинома первой степени:

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

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:

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

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

где  $\alpha_i^{\alpha\beta}$  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;  $U_{Pt}$  и  $U_{Tt}$  – значения электрических сигналов канала давления и канала температуры датчика в момент времени  $t$ .

Очевидно, что коэффициенты  $a_i^{\alpha\beta}$  зависят только от температуры. Коэффициенты  $\gamma_{il}^{\alpha\beta}$  являются постоянными величинами для каждого сегмента  $\Pi_{UT}^{\alpha\beta}$  и не зависят от температуры.

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

Для определения коэффициентов в выражениях (1), (2) и (3) используется метод наименьших квадратов. Для каждого сегмента  $\Pi_{UT}^{\alpha\beta}$  определяется свой набор коэффициентов.

Схема использования МСПА ХП датчика для измерения физической величины (давления) с учетом воздействия внешнего фактора (температуры):

В процессе измерения на выходе канала давления и канала температуры датчика зафиксированы электрические сигналы  $U_{P_k}$  и  $U_{T_k}$ , полученные при воздействии текущих значений давления  $P_k$  и температуры окружающей среды  $T_k$ .

По известным значениям электрических сигналов  $U_{P_k}$  и  $U_{T_k}$  находится область определения сегмента пространственной характеристики преобразования. Сначала вычисляется номер интервала разбиения по температуре  $\beta$ . Используется текущее значение электрического сигнала канала температуры ( $U_{T_k} \in \Omega_{\alpha\beta}$ ). Затем вычисляется номер интервала разбиения  $\alpha$ , которому принадлежит текущее значение сигнала канала давления ( $U_{P_k} \in \Omega_{\alpha\beta}$ ). Номер интервала разбиения по температуре  $\beta$  в данном случае играет роль ограничивающего фактора.

Выбирается сегмент модели, соответствующий области определения  $\Omega_{\alpha\beta}$ , полученной на предыдущем этапе обработки. Фактически определяются значения коэффициентов в выражениях (1) или (2).

Согласно выражениям (1) или (2) вычисляется давление. Для этого используются определенные коэффициенты аппроксимации и текущие значения электрических сигналов каналов давления и температуры.

**Результаты моделирования характеристики преобразования.** Исходные данные для моделирования были получены при проведении градуировочных испытаний двух первичных измерительных преобразователей (сенсоров) датчиков давления, сенсор №1 и сенсор №2. Сенсоры предназначены для измерения 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.

Анализ данных испытаний показал, что имеется небольшая нелинейность реальной функции преобразования сенсоров при фиксированной температуре. Нелинейность возрастает на начальном и конечном участках диапазона изменения давления по оси давлений. Выходной сигнал с канала температуры имеет ярко выраженный нелинейный характер. Для фиксированного давления наблюдается нелинейный рост сигнала при низких температурах и снижение при высоких температурах. Реальная функция преобразования сенсоров представляет собой поверхность в системе параметров  $P \times U_P \times U_T$ . Если ориентироваться по оси давления, то нижняя и верхняя части поверхности повернуты друг относительно друга относительно условной линии раздела. Для сенсора № 2 эта линия раздела наблюдается при  $P \sim 360-380$  КПа.

В целом график в системе параметров  $P \times U_P \times U_T$  носит нелинейный характер и требует построения характеристики преобразования, учитывающей эти особенности.

Для оценки возможности управления погрешностью при использовании МСПА ХП для сенсоров №1 и №2 были выбраны конфигурации линейных и нелинейных пространственных элементов с учетом особенностей координатной сетки испытаний в области изменения факторов  $P \times T$ .

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

Для моделирования, с учетом ограничений, связанных с объемом испытаний, были выбраны минимальные из допустимых размеры пространственных элементов.

Результаты моделирования для сенсора №1 при температурах  $T = -40^\circ\text{C}$  и  $T = 80^\circ\text{C}$  представлены на рис. 3, 4.

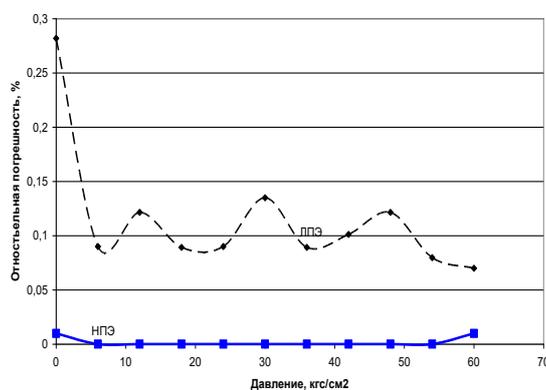


Рис. 3. Относительная погрешность аппроксимации характеристики преобразования датчика с сенсором №1 при  $T = -40^\circ\text{C}$  (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

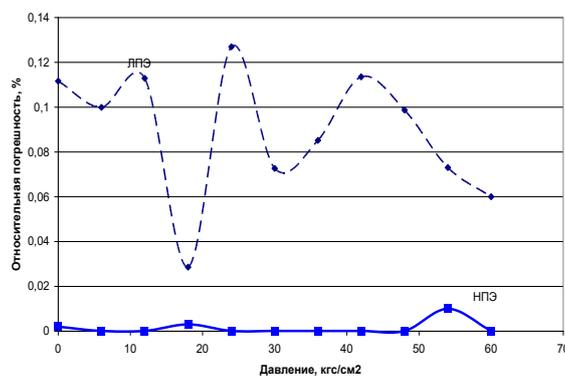


Рис. 4. Относительная погрешность аппроксимации характеристики преобразования датчика с сенсором №1 при  $T = 80^\circ\text{C}$  (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

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

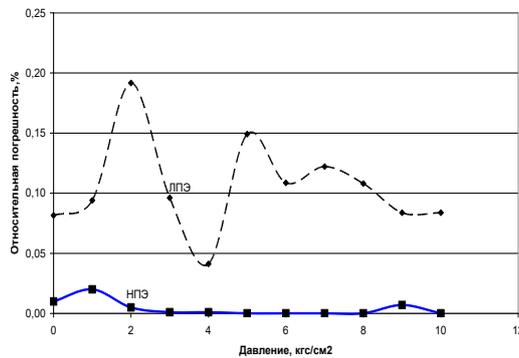


Рис. 5. Относительная погрешность аппроксимации характеристики преобразования датчика с сенсором №2 при  $T = -40^{\circ}\text{C}$  (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

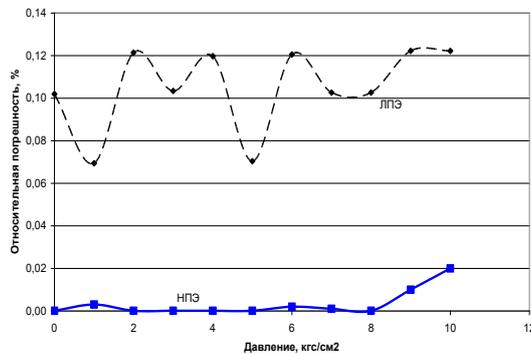


Рис. 6. Относительная погрешность аппроксимации характеристики преобразования датчика с сенсором №2 при  $T = 80^{\circ}\text{C}$  (пунктир – линейная модель; сплошная – нелинейная модель)

**Закключение.** 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 кгс/см<sup>2</sup> до 10 кгс/см<sup>2</sup> 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 основан на комбинированном применении 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. *Bartkovjak 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). IEEE International Symposium.* 4-7 July 2010. – 2010. – P. 3356-3361.
6. *Gorbulnov S.F., Tsyplin 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 линейризации 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).* Научное издание 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.* Мультисегментная 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. Мультиотрезочная пространственная аппроксимация градуировочной характеристики микропроцессорного датчика // Метрология. – 2011. – № 7. – С. 26-36.
20. Klevtsov and Y. Udod. Model of the Spatial Conversion Characteristics for Graduation of the Microprocessor-Based Sensor's with Indemnification of Influence Destabilizing Factors // 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. Bartkovejsek 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). IEEE International Symposium. 4-7 July 2010*, pp. 3356-3361.
6. Gorbunov S.F., Tsybin 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 [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 control 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 nauchnogo 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 experimental techniques], 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). Nauchnoe izdanie 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 characteristics 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. Tekhnicheskie 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 characteristics 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 graduirovochnykh kharakteristik sredstv izmereniy [Methods of construction of calibration characteristics of measuring instruments]. Moscow: Izd-vo standartov, 1986.
19. *Klevtsov S.I.* Mul'tisegmentnaya prostranstvennaya approksimatsiya graduirovochnoy kharakteristiki mikroprotsessornogo datchika [Multi-segment spatial approximation of the calibration characteristic of a microprocessor sensor], *Metrologiya* [Metrology], 2011, No. 7, pp. 26-36.
20. *Klevtsov and Y. Udod.* Model of the Spatial Conversion Characteristics for Graduation of the Microprocessor-Based Sensor's with Indemnification of Influence Destabilizing Factors, 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 551.554

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-234-243

**Г.В. Куповых, А.Г. Клово, В.В. Гривцов, О.В. Белоусова**  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ**  
**НЕТУРБУЛЕНТНОГО ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ**

*Представлена электродинамическая модель атмосферного приземного слоя, обусловленная действием электродного эффекта вблизи поверхности земли, и анализ ее уравнений методами теории подобия. Отдельно рассмотрены математические модели электрического состояния приземного слоя в приближениях классического и турбулентного электродного эффекта. В математической постановке задач моделирования классического электродного слоя сделан ряд обоснованных физических допущений, позволивших получить аналитические решения уравнений. Получены аналитические формулы для расчетов профилей концентраций аэроионов, плотности объемного электрического заряда и напряженности электрического поля в электродном слое. В результате математического модели-*