

УДК 621.372.542

**АППРОКСИМАЦИОННЫЙ МЕТОД КОРРЕКЦИИ НЕЛИНЕЙНОСТИ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОРЕЗИСТИВНОГО ДАТЧИКА\*****П.К. Ланге**Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Рассмотрен метод коррекции погрешности нелинейности измерительного преобразователя с характеристикой, имеющей существенную нелинейность. Метод основан на использовании параболической сплайн-аппроксимации дискретных значений характеристики датчика. В связи с существенной нелинейностью характеристики используется ее неравномерная дискретизация. С целью уменьшения числа интервалов дискретизации длина интервала обратно пропорциональна производной характеристики датчика. Рассмотрена погрешность сплайн-аппроксимации конкретного датчика – термистора. Показано, что использование сплайн-аппроксимации дискретных значений характеристики позволяет в несколько раз снизить погрешность аппроксимации по сравнению с широко распространенной кусочно-линейной аппроксимацией характеристики. С целью определения граничных значений функции сплайн-аппроксимации предложено экстраполировать функцию характеристики за границы динамического диапазона характеристики. Рассмотренный метод может быть легко реализован с использованием современных микропроцессорных измерительных систем.*

**Ключевые слова:** измерительный преобразователь, нелинейность характеристики, сплайн-аппроксимация, кусочно-линейная аппроксимация, погрешность аппроксимации.

Характеристики практически всех датчиков различных параметров имеют определенную нелинейность; кроме того, характеристики могут меняться при различных режимах их работы.

На практике динамический диапазон преобразования датчиков может иметь значительную величину, однако линейный диапазон обычно много меньше полного динамического диапазона.

Например, для микродатчика расхода газа AWM2300 фирмы Honeywell линейный диапазон составляет около 20 % от полного динамического диапазона [1], аналогичная ситуация характерна и для ряда современных микродатчиков разнообразных физических параметров [2–4].

Для расширения линейного динамического диапазона используются различные методы коррекции нелинейности. Наибольшее распространение на практике получил метод реализации функции, обратной функции нелинейной характеристики датчика, а также метод реализации функции нелинейной характеристики функциональным преобразователем, включенным в цепь отрицательной обратной связи предусилителя сигнала, формируемого датчиком [1].

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-08-00252 А.

Петр Константинович Ланге (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Информационно-измерительная техника».

В обоих случаях используется либо аппроксимация функции нелинейной характеристики датчика, либо аппроксимация обратной функции. Наиболее распространенной является кусочно-линейная аппроксимация функции, заданной либо таблично, либо аналитически, такой способ и реализуется наиболее просто. При сравнительно небольшой нелинейности характеристики датчика может быть использована равномерная дискретизация характеристики, однако при сильной нелинейности с целью ограничения числа участков дискретизации и снижения погрешности аппроксимации характеристики приходится использовать неравномерную дискретизацию.

Следует отметить, что при определении табличных значений характеристики датчика на практике зачастую не удается обеспечить ее равномерную дискретизацию.

Например, при аппроксимации характеристики терморезистора, характеристика которого для температурного диапазона (-30...+100) °С представлена на рис. 1, при использовании 50 участков аппроксимации этой характеристики при равномерной дискретизации погрешность аппроксимации составила 13 %, а при неравномерной дискретизации – 0,2 % [5].

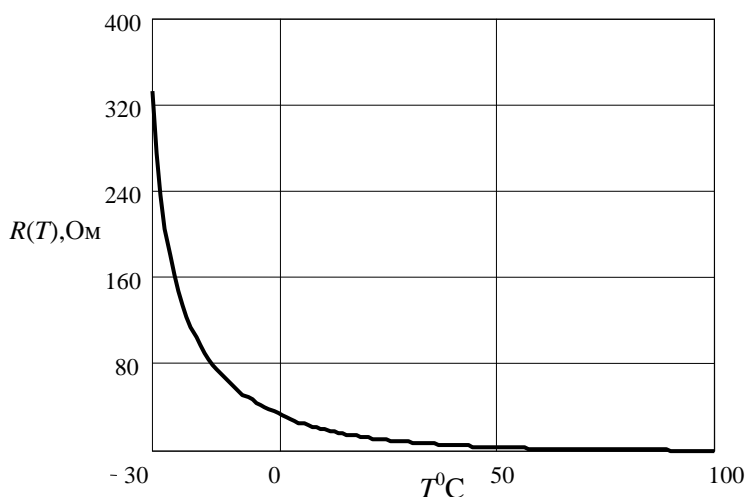


Рис. 1. График характеристики термистора

Недостатком кусочно-линейной аппроксимации характеристики является наличие скачков по ее первой производной на границах участков аппроксимации, что вызывает появление помех при необходимости определения производной сигнала, формируемого датчиком.

От этого недостатка свободна аппроксимация характеристики датчика параболической или кубической сплайн-функцией, которая не имеет скачков по производной на границах участков аппроксимации характеристики, к тому же сплайн-аппроксимация обеспечивает существенно меньшую погрешность по сравнению с кусочно-линейной аппроксимацией.

Рассмотрим аппроксимацию характеристики термистора (см. рис. 1) параболической сплайн-функцией, коэффициенты которой определяются цифровым фильтром, определяемым выражениями [7]

$$\left. \begin{aligned} a_0[n] &= \frac{1}{16}(-R[n-2] + 4 \cdot R[n-1] + 10 \cdot R[n] + 4 \cdot R[n+1] - R[n+2]), \\ a_1[n] &= \frac{1}{8 \cdot \Delta T[n]}(R[n-2] - 6 \cdot R[n-1] + 6 \cdot R[n+1] - R[n+2]), \\ a_2[n] &= \frac{1}{16 \cdot (\Delta T[n])^2}(-R[n-2] + 7 \cdot R[n-1] - 6 \cdot R[n] - 6 \cdot R[n+1] + \\ &+ 7 \cdot R[n+2] - R[n+3]). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь  $\Delta T[n]$  – длина  $n$ -го участка дискретизации характеристики термистора (см. рис. 1),  $R[n]$  – значение его сопротивления в  $n$ -й дискретной точке.

Недостатком сплайн-функций является их неопределенность на краевых условиях: как видно из рассмотрения выражений (1), определяющих коэффициенты парабол на каждом участке дискретизации характеристики, сплайн-функция не определена на участках дискретизации с номерами 1, 2,  $(n-2)$ ,  $(n-1)$ ,  $n$ .

Для устранения этого недостатка характеристика датчика (в данном случае термистора) может быть экстраполирована за границы полного динамического диапазона датчика с помощью какого-либо выражения.

При экстраполяции характеристики термистора с помощью выражения [6]

$$R_i(T) = \frac{1}{A + BT + CT^2 + DT^3 + (E + F)T^4 + FT^5 + GT^6}, \quad (2)$$

где  $A = 3,063 \cdot 10^{-2}$ ,  $B = 1,57 \cdot 10^{-3}$ ,  $C = 3,43 \cdot 10^{-5}$ ,  $D = 4,8 \cdot 10^{-7}$ ,  $E = 2,6 \cdot 10^{-9}$ ,  $F = 2,27 \cdot 10^{-11}$ ,  $G = -2,64 \cdot 10^{-14}$ , на более широкий температурный диапазон  $(-27 \dots +150)^\circ\text{C}$  сплайн-аппроксимация характеристики, изображенной на рис. 1, при 30 участках дискретизации практически совпадает с самой характеристикой.

Длина участков дискретизации (закон дискретизации) в данном случае определялась выражением

$$\Delta T[n] = T[n+1] - T[n] = T_{min} + \frac{k \cdot \Delta T_{min}}{\Delta R[n]}, \quad (3)$$

где  $\Delta R[n]$  – дискретное изменение функции  $R(T)$  при предварительном равномерном разбиении диапазона температур на 50 дискретных участков;

$T_{min}$  – нижняя граница диапазона температур;

$\Delta T_{min}$  – длина дискретного участка в районе  $T_{min}$ ;

$k$  – коэффициент в пределах  $0,05 \dots 1$ .

Как видно из (2), длина участка дискретизации в данном случае обратно пропорциональна производной характеристики термистора (см. рис. 1).

Следует отметить, что закон дискретизации (2) может быть произвольным, на практике точки дискретизации могут определяться таблицей метрологической аттестации конкретного датчика.

Зависимость относительной погрешности аппроксимации характеристики термистора от температуры для диапазона  $(-30 \dots +10)^\circ\text{C}$  при использовании описанного выше алгоритма сплайн-аппроксимации, а также аналогичная зависимость при кусочно-линейной аппроксимации при 30 участках дискретизации

представлены на рис. 2. Погрешность аппроксимации характеристики в диапазоне температур 10...100 °С пренебрежимо мала.

Как видно из рассмотрения рис. 2, погрешность аппроксимации при использовании сплайн-функции примерно в 3 раза меньше аналогичной погрешности при использовании кусочно-линейной аппроксимации при том же числе дискретных участков на полном динамическом диапазоне датчика-термистора.

Сам алгоритм сплайн-аппроксимации, определяемый выражениями (1), достаточно просто реализуется современными микропроцессорными контроллерами.

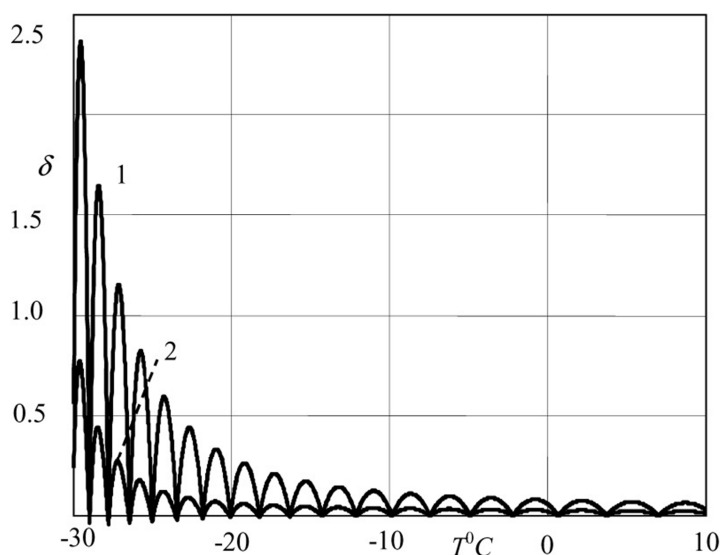


Рис. 2. Зависимости относительной погрешности аппроксимации характеристики термистора при переменной дискретизации и 30 участках дискретизации:

- 1 — при использовании параболической сплайн-аппроксимации;  
2 — при использовании кусочно-линейной аппроксимации

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ланге П.К., Платонов И.А., Унгаров М.Б. Коррекция нелинейности характеристик датчиков с использованием аппроксимации // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. — 2014. — № 3(43). — С. 53–57.
2. Датчики теплофизических и механических параметров: Справочник. Т. 1, кн. 1 / Под общ. ред. Коптева Ю.Н., под ред. Багдатьяева Е.Е., Гориша А.В., Малкова Я.В. — М.: ИПЖР, 1998.
3. Обвинцева Л.А. Полупроводниковые металлооксидные сенсоры для определения химически активных газовых примесей в воздушной среде // Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. — 2008. — Т. LI. — № 2. — С. 113–121.
4. Суханова Н.Н., Суханов В.И., Юровский А.Я. Полупроводниковые термопреобразователи с расширенным диапазоном рабочих температур // Датчики и системы. — 1999. — № 7, 8.
5. Ланге П.К., Унгаров М.Б. Кусочно-линейная аппроксимация характеристики терморезистивных датчиков с использованием неравномерной дискретизации // Информационно-измерительные и управляющие системы: Сб. — Самара: СамГТУ, 2014. — Вып. 1(9). — С. 45–50.
6. Мэклин Э.Д. Терморезисторы. — М.: Радио и связь, 1983. — 208 с.
7. Ланге П.К. Сплайн-аппроксимация дискретных значений сигналов с применением методов цифровой фильтрации // Сб. труд. Самарского гос. тех. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. — Самара: СамГТУ, 2003. — Вып. 19. — С. 134–138.

Статья поступила в редакцию 14 июня 2017 г.

## CORRECTION OF THE DYNAMIC ERROR OF INERTIAL SENSORS

***P.K. Lange***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*The method of dynamic error correction for inertia sensor having a transfer function type aperiodic operator of the first order is considered. The method is based on the realization of the inverse sensors operator in a dynamic mode. Correction method uses a parabolic spline-approximation of discrete values of sensors signal, as well as its first derivative. An example of correction of the signal formed by the inertia sensor of a particular type is described. It is shown that the use of a mathematical correction method based on digital filter in-line processing of discrete signal values allows to reduce in several times the dynamic error of inertia sensor. It is proposed to use the method described above also for the correction of the sensors signal, the operator of which having the second order. The considered method can be easily implemented using modern microprocessor measuring systems.*

**Keywords:** *sensor, inertia, frequency response, transfer function, measured parameter, dynamic error, spline-approximation.*