

УДК 62.002.3:681.2

## КОРРЕКЦИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППРОКСИМАЦИИ\*

*П.К. Ланге<sup>1</sup>, И.А. Платонов<sup>2</sup>, М.Б. Унгаров<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

<sup>2</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С.П. Королёва  
Россия, 443086, г. Самара, Московское ш., 34

*Рассмотрена задача коррекции нелинейности характеристик современных микродатчиков, при этом используется аппроксимация их дискретных значений. Коррекция нелинейности осуществляется с использованием либо прямой, либо обратной функции характеристики датчика. В качестве аппроксимирующей функции характеристики датчика использована кубическая сплайн-функция. Аппроксимирующая функция реализуется микропроцессорным аналоговым конвертером. Рассмотрены схемы корректирующих блоков с включением корректирующего функционального преобразователя в прямую цепь, а также в цепь отрицательной обратной связи входного буферного усилителя. Показано, что предлагаемая схема позволяет снизить погрешность нелинейности характеристики датчика в несколько десятков раз.*

**Ключевые слова:** характеристика датчика, нелинейность характеристики, обратная функция, коррекция нелинейности, аппроксимация, усилитель.

В настоящее время микродатчики начинают широко применяться в различных промышленных приложениях, а также в портативных системах анализа состава и свойств веществ. Характеристики таких датчиков имеют определенную нелинейность, кроме того, их вид может изменяться для различных режимов работы.

Важным преимуществом таких датчиков является малая постоянная времени, что обеспечивает малую динамическую погрешность при измерении быстро изменяющихся параметров. Тем не менее использование таких микродатчиков ограничивается сильной нелинейностью их характеристик.

Обычно для определения характеристики датчика при его метрологической аттестации используют ограниченный набор поверочных опытов. В качестве примера можно привести характеристику датчика AWM2300 фирмы Honeywell, значения которой (в соответствии с фирменным описанием) приведены в таблице, определенной по фирменной характеристике датчика.

**Значения характеристики датчика AWM2300**

Расход $q_x$	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0	+0,2	+0,4	+0,6	+0,8	+1,0
Вых. сигнал $U_v$ , мВ	-31	-30	-28	-24	-18	0	18	24	28	30	31

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №14-08-00700.

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

*Игорь Артемьевич Платонов (д.т.н. проф.), зав. кафедрой «Химия» СГАУ.  
Марат Булатович Унгаров, аспирант.*

Аналогичный вид имеют характеристики микродатчиков расхода серии PFMV5.

Аппроксимация приведенных табличных значений

$$x = q_x / q_{\max}, \quad y = U_y / U_{y\max},$$

где  $q_{\max}$ ,  $U_{y\max}$  – максимальные значения входного параметра (в данном случае расхода газа) и выходного сигнала соответственно, кубическая сплайн-функция  $y = f(x)$  представлена на рис. 1.

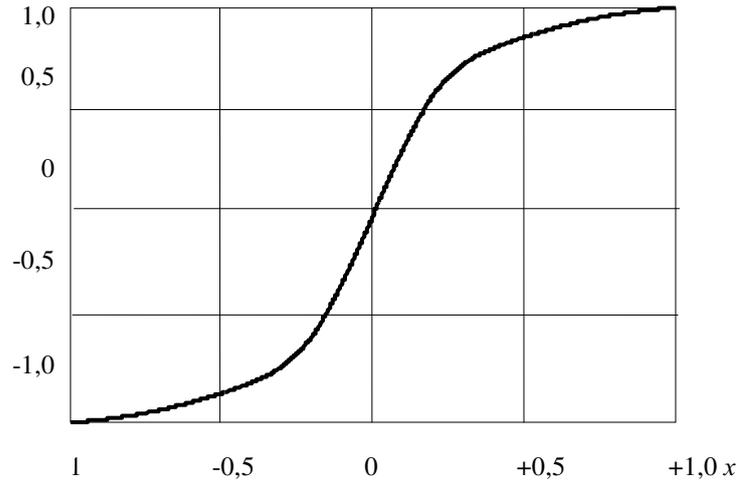


Рис. 1. Кубическая сплайн-аппроксимация прямой функции  $f(x)$  датчика

Из рассмотрения рисунка видно, что в полном диапазоне входного параметра погрешность нелинейности характеристики достигает 40 %. Это вынуждает с целью снижения этой погрешности использовать очень малый диапазон входного параметра, порядка 10 % его полного диапазона.

Снизить погрешность нелинейности можно, используя одну из схем, изображенных на рис. 2 и рис. 3.

В схеме, изображенной на рис. 2, сигнал  $U_x$ , формируемый датчиком Д, поступает на вход неинвертирующего повторителя (на усилителе DA), а затем – на вход функционального преобразователя ФП, реализующего функцию  $z = f(y) = f^{-1}(x)$ , обратную функции  $f(x)$  нелинейной характеристики датчика.

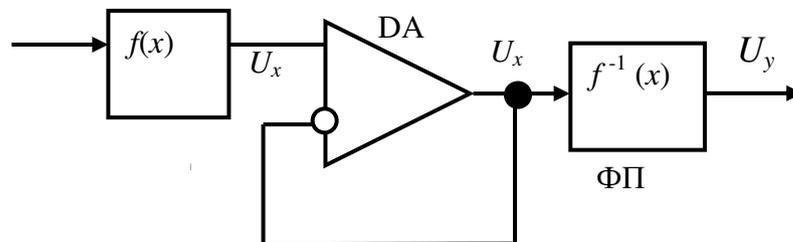


Рис. 2. Схема для линеаризации характеристики датчика с использованием обратной функции его характеристики

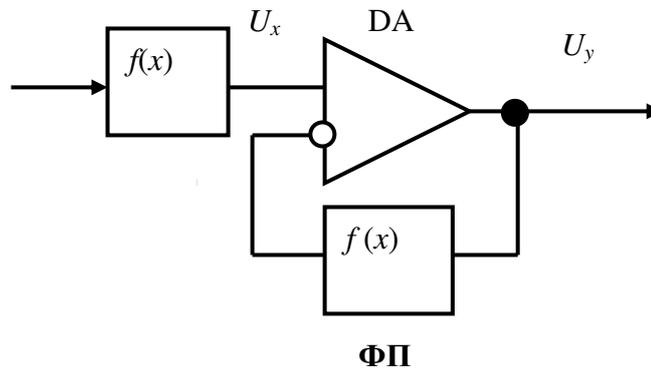


Рис. 3. Схема для линейризации характеристики датчика с использованием прямой функции его характеристики

Аппроксимацию обратной функции [1] нелинейной характеристики датчика можно легко определить на основании значений, приведенных в таблице.

Кубическая сплайн-аппроксимация такой функции приведена на рис. 4.

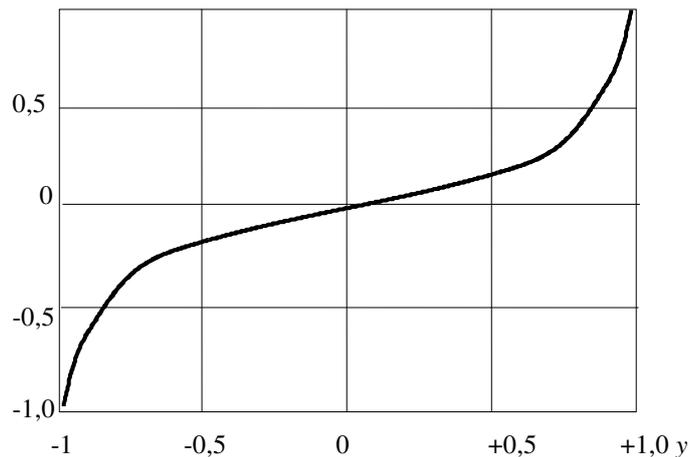


Рис. 4. Кубическая сплайн-аппроксимация функции  $z = f(y)$ , обратной прямой функции  $f(x)$  датчика

В схеме, изображенной на рис. 3, функциональный преобразователь ФП реализует функцию, идентичную нелинейной характеристике  $f(x)$  датчика, этот преобразователь включен в цепь отрицательной обратной связи усилителя DA. Следует заметить, что усилитель DA обычно входит в стандартную схему формирования выходного сигнала датчика, рекомендуемую его фирмой-изготовителем.

В обоих случаях происходит коррекция погрешности, вызванной нелинейностью характеристики датчика, то есть в идеальном случае схема реализует линейную зависимость

$$U_y = f^{-1}[f(x)] = kx.$$

На практике, однако, погрешность таких схем будет определяться погрешностью аппроксимации табличных значений характеристики датчика.

Рассмотрим такую погрешность для схем, изображенных на рис. 1, рис. 2, на примере датчика, значения характеристики которого приведены в таблице.

График такой результирующей приведенной погрешности коррекции нелинейной характеристики датчика

$$\delta x = (f^{-1}[f(x)] - x) \cdot 100 \%$$

приведен на рис. 5. Как видно из рассмотрения этого графика, погрешность коррекции нелинейности датчика в полном диапазоне входного параметра не превышает 1 %, что удовлетворяет требованиям значительного количества практических приложений. Следует заметить, что воспроизводимость характеристик таких датчиков (в частности серии PFMV5) составляет  $\pm 2 \%$ .

В качестве функционального преобразователя ФП (см. рис. 1, рис. 2) может быть выбран микропроцессорный аналоговый конвертор типа ADuC831, ADuC834 фирмы Analog Devices.

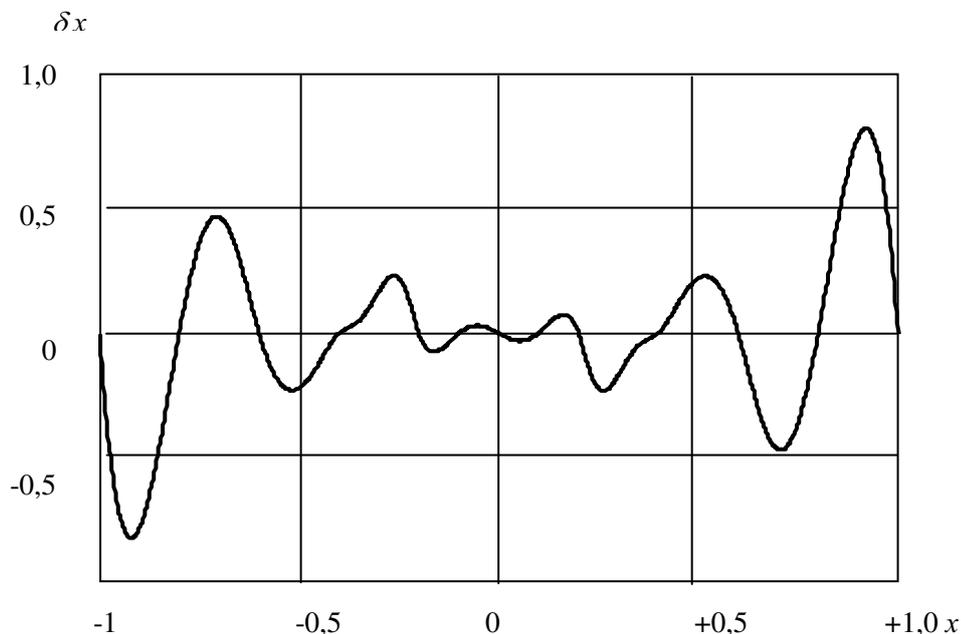


Рис. 5. График  $\delta x$  приведенной погрешности в системе коррекции нелинейной характеристики датчика

Этот конвертер на  $n$ -м участке дискретизации характеристики датчика реализует кубическую сплайн-аппроксимацию

$$y(x) = a_3[n]x^3 + a_2[n]x^2 + a_1[n]x + a_0[n],$$

коэффициенты которой вычисляются по формулам [2]

$$a_0[n] = \frac{1}{36}(-x[n-2] + 4x[n-1] + 30x[n] + 4x[n+1] - x[n+2]);$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1[n] = \frac{1}{12x_d} (x[n-2] - 8x[n-1] + 8x[n+1] - x[n+2]); \\ a_2[n] = \frac{1}{12x_d^2} (-x[n-2] + 10x[n-1] - 18x[n] + 10x[n+1] - x[n+2]); \\ a_3[n] = \frac{1}{36x_d^3} (x[n-2] - 11x[n-1] + 28x[n] - 28x[n+1] + 11x[n+2] - x[n+3]). \end{array} \right.$$

Эти формулы представляют собой выражения цифровой фильтрации, достаточно просто реализуемые микропроцессорным аналоговым конвертером.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Солопченко Г.Н. Обратные задачи в измерительных процедурах // Измерение, контроль, автоматизация. ЦНИИТЭИприборостроения. – 1983. – Вып. 2(46). – С. 32-46.
2. Ланге П.К. Сплайн-аппроксимация дискретных значений сигналов с применением методов цифровой фильтрации // Сб. трудов Самарского государственного технического университета. Сер. Физико-математические науки. – Самара: СамГТУ, 2003. – Вып. 19. – С. 134-138.

Статья поступила в редакцию 5 июля 2014 г.

## NON - LINEARITY CHARACTERISTICS CORRECTION IN SENSORS WITH APPROXIMATION USING

**P.K. Lange<sup>1</sup>, I.A. Platonov<sup>2</sup>, M.B. Ungarov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

<sup>2</sup> S.P. Korolyov Samara State Aerospace University  
34, Moskovskoye sh., Samara, 443086, Russian Federation

*The problem of nonlinearity characteristics correction of modern microsensors, with use of approximation discrete characteristics is considered. Linearity correction is performed with the use of either direct or inverse characteristics of the sensors. As approximating function of the sensor characteristic a cubic spline - function is used. Approximating function is done by the microprocessor analog converter. The schemes of correcting converter with a functional transducer in a straight chain as well as in a negative feedback of the buffer amplifier are considered. The proposed device can reduce the nonlinearity error sensor characteristics in a few dozen times.*

**Keywords:** sensor characteristic, nonlinearity characteristic, an inverse function, the correction of non-linearity, approximation, amplifier.

---

*Petr K. Lange (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Igor A. Platonov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Marat B. Ungarov, Postgraduate Student.*