

# Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 621.372.542

## КОРРЕКЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИНЕРЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ\*

*П.К. Ланге*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Рассмотрен метод коррекции динамической погрешности инерционного измерительного преобразователя с передаточной функцией, имеющей вид апериодического звена первого порядка. Метод основан на реализации обратной функции оператора, описывающего инерционный измерительный преобразователь в динамическом режиме. Метод коррекции использует параболическую сплайн-аппроксимацию дискретных значений измерительного сигнала, формируемого измерительным преобразователем, а также его первой производной. Приведен пример коррекции сигнала измерительного преобразователя конкретного типа. Показано, что использование математического метода коррекции на базе цифровых фильтров скользящей обработки дискретных значений сигнала позволяет в несколько раз снизить динамическую погрешность инерционного измерительного преобразователя. Предложено использовать описанный метод также и для коррекции сигнала измерительного преобразователя, передаточная функция которого соответствует инерционному звену второго порядка. Рассмотренный метод может быть легко реализован с использованием современных микропроцессорных измерительных систем.*

**Ключевые слова:** измерительный преобразователь, инерционность, частотная характеристика, передаточная функция, измеряемый параметр, динамическая погрешность, сплайн-аппроксимация.

Измерительные преобразователи (ИП), как известно, обладают большей или меньшей инерционностью, которая затрудняет их использование в системах экспресс-анализа контролируемого параметра. Такие преобразователи, как термопары, терморезисторы, измерители электрохимических параметров жидкостей, измерители параметров индуктивных промышленных установок, могут характеризоваться длительностью переходного процесса от нескольких секунд до нескольких минут. Большая инерционность таких преобразователей вызвана, с одной стороны, длительностью процессов установления равновесия по окончании физических и химических процессов внутри конструкции измерительного преобразователя, с другой – инерционностью его чувствительных элементов. Этот фак-

---

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

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

тор вызывает появление динамической погрешности при регистрации быстро изменяющихся измерительных параметров.

Целью данной работы является разработка математического метода коррекции указанной динамической погрешности.

При динамических измерениях интерес представляет не выходной сигнал преобразователя  $y(t)$ , а контролируемый входной параметр  $x(t)$ . Поэтому задачей коррекции сигнала  $y(t)$  является определение значений параметра  $x(t)$  с учетом оператора  $K$ , характеризующего динамические свойства преобразователя и его аппаратную функцию. В современных измерительных системах аналоговый выходной сигнал  $y(t)$  ИП преобразуется аналого-цифровым преобразователем в его дискретные значения  $y(n)$ .

Задача коррекции может быть решена реализацией оператора  $K^{-1}$ , обратного оператору  $K$ , при соответствующей обработке дискретных значений сигнала  $y(t)$  [1].

В наиболее распространенном случае инерционный ИП имеет передаточную функцию апериодического звена первого порядка

$$K(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{K_0}{Tp + 1}, \quad (1)$$

где  $T$  – постоянная времени ИП.

При  $K_0 = 1$  передаточная функция корректирующей цепи принимает вид

$$K^{-1}(p) = \frac{z(p)}{y(p)} = Tp + 1,$$

что соответствует реализуемому дифференциальному уравнению

$$z(t) = T \frac{dy(t)}{dt} + y(t). \quad (2)$$

Таким образом, такой метод коррекции динамической погрешности должен реализовать функцию дифференцирования сигнала  $y(t)$  и сложения его производной с самим сигналом.

Фактически при этом решается обратная задача, однако для возможности ее физической реализации выходной сигнал корректирующей цепи должен иметь определенное запаздывание по отношению к параметру, контролируемому инерционным ИП.

Для решения задачи коррекции в [2] было предложено использовать цифровой фильтр, реализующий параболическую сплайн-аппроксимацию дискретных значений сигнала  $y(t)$ , а также его производной.

При использовании параболической сплайн-аппроксимации на  $n$ -м дискретном участке сигнал описывается параболической функцией

$$y_n(t) = b_2[n]t^2 + b_1[n]t + b_0[n],$$

где  $a_2, a_1, a_0$  – коэффициенты аппроксимирующей параболической функции.

Коэффициенты такой аппроксимации могут быть определены с использованием цифровых фильтров «скользящей» обработки дискретных значений сигнала  $y(t)$  в реальном темпе времени. Число точек весовых функций таких фильтров обычно лежит в пределах 4...6.

В частности, коэффициенты цифровых фильтров пятиточечной сплайн-аппроксимации сигнала  $y(t)$  по его дискретным значениям  $y(n)$  определяются выражениями [2]:

$$\left. \begin{aligned} b_0[n] &= \frac{1}{16}(-y[n-2] + 4y[n-1] + 10y[n] + 4y[n+1] - y[n+2]); \\ b_1[n] &= \frac{1}{8}(y[n-2] - 6y[n-1] + 6y[n+1] - y[n+2]); \\ b_2[n] &= \frac{1}{16}(-y[n-2] + 7y[n-1] - 6y[n] - 6y[n+1] + 7y[n+2] - y[n+3]). \end{aligned} \right\} (3)$$

Коэффициенты пятиточечной параболической сплайн-функции, аппроксимирующей производную сигнала  $y(t)$ , определяются выражениями [3]:

$$\left. \begin{aligned} c_0[n] &= \frac{1}{12}(y[n-2] - 8y[n-1] + 8y[n+1] - y[n+2]); \\ c_1[n] &= \frac{1}{6}(-x[n-2] + 10x[n-1] - 18x[n] + 10x[n+1] - x[n+2]); \\ c_2[n] &= \frac{1}{12}(y[n-2] - 9y[n-1] + 22y[n] - 22y[n+1] + 9y[n+2] - y[n+3]). \end{aligned} \right\} (4)$$

Таким образом, скорректированный сигнал определяется выражением

$$z(t) = d_2[n]t^2 + d_1[n]t + d_0[n], \quad (5)$$

где

$$\left. \begin{aligned} d_0[n] &= b_0[n] + T \cdot c_0[n]; \\ d_1[n] &= b_1[n] + T \cdot c_1[n]; \\ d_2[n] &= b_2[n] + T \cdot c_2[n]. \end{aligned} \right\} (6)$$

При  $t = 0$  из (4) следует

$$z(n) = d_0[n] = b_0[n] + T \cdot c_0[n]. \quad (7)$$

Как видно из (3), скорректированный сигнал  $z(t)$  формируется относительно дискретных значений выходного сигнала  $y(n)$  измерительного преобразователя с задержкой в 2 дискретных интервала.

Форма скорректированного сигнала (4) в идеальном случае должна соответствовать форме входного параметра  $x(t)$ .

Использование сплайн-аппроксимации позволяет определить значения сигнала  $z(t)$  внутри интервалов дискретизации, что является достоинством рассматриваемого метода.

Рассмотрим в качестве примера коррекцию сигнала детектора по теплопроводности, широко распространенного в расходомерах микропотоков газов, в газоаналитических приборах, в хроматографических анализаторах и других приборах для анализа состава веществ.

Рассмотрим возможность коррекции динамической погрешности такого детектора с постоянной времени  $T$  в выражении (1), равной 0,1 с.

Во многих практических случаях [5] контролируемый с помощью такого ИП параметр имеет вид функции, близкой к гауссовому закону.

Рассмотрим коррекцию выходного сигнала такого ИП при измеряемом параметре, изменяющемся в соответствии с гауссовой функцией единичной высоты (рис. 1) с шириной примерно 0,05 с:

$$x(t) = \exp\left[-\frac{(t-0.05)^2}{0.015}\right]. \quad (8)$$

При передаточной функции (1) ИП

$$W(p) = \frac{1}{Tp+1},$$

его переходная характеристика определяется выражением

$$h(t) = (1 - e^{-\frac{t}{T}}).$$

Выражение для сигнала  $y(t)$  на выходе ИП может быть получено с использованием интеграла Дюамеля:

$$y(t) = \frac{1}{T} \int_0^t \left[ \exp\left(-\frac{(t-\tau-0.05)^2}{0.015}\right) \right] \exp\left(-\frac{\tau}{T}\right) d\tau.$$

Для конкретного значения постоянной времени  $T = 0,1$  с передаточной функции (1) ИП график этой функции изображен на рис. 1. Как видно из рассмотрения графика, такой ИП характеризуется очень большой динамической погрешностью.

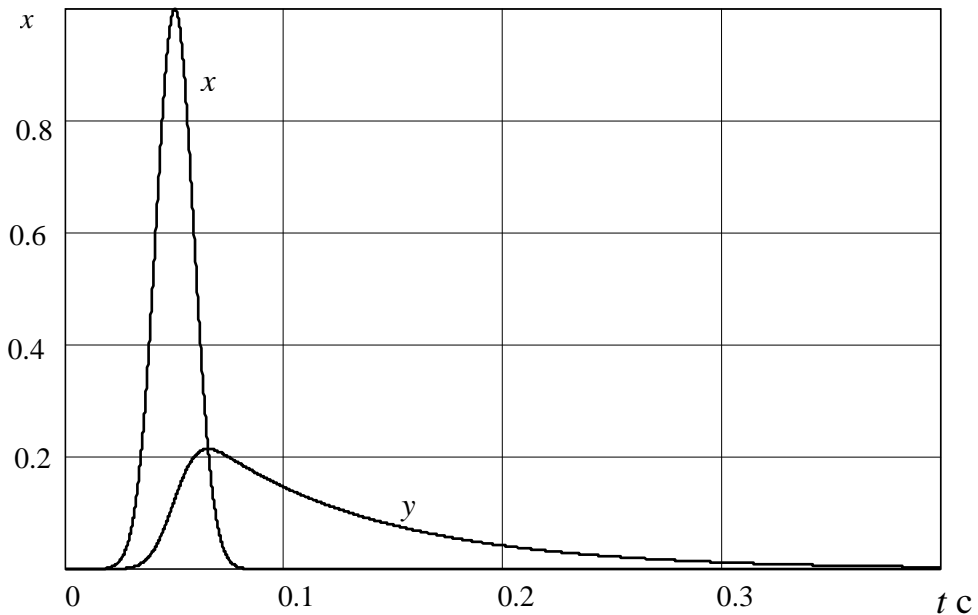


Рис. 1. Сигналы на входе и выходе инерционного ИП:  
 $x$  – график изменения параметра на входе ИП;  $y$  – сигнал на выходе ИП

Функция скорректированного сигнала  $z(t)$  определяется при аппроксимации дискретных значений сигнала  $y(t)$  параболической сплайн-функцией с использованием выражений (3) – (4) для коэффициентов аппроксимации, а также выражений (5) – (6) для метода коррекции.

Графики этих функций представлены на рис. 2, при рассмотрении которого видно, что предложенный алгоритм достаточно эффективно восстанавливает по форме сигнал  $x(t)$ , действующий на входе инерционного детектора, однако скорректированный сигнал  $z(t)$  запаздывает на 2 интервала дискретизации по отношению к контролируемому параметру  $x(t)$ .

При наличии в потоке газа нескольких примесей, размещенных в потоке на некотором расстоянии друг от друга, детектор регистрирует последовательно

соответствующие им пики. Такая ситуация характерна для различных хроматографических анализаторов и ряда газоаналитических приборов.

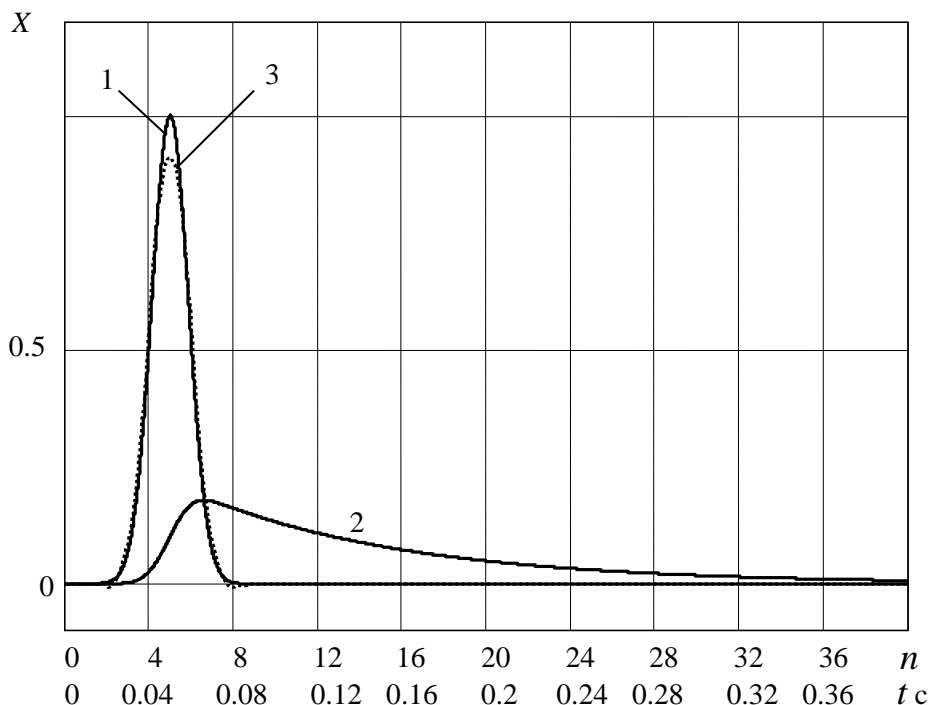


Рис. 2. Диаграммы сигналов при коррекции динамической погрешности.

- 1 - параметр  $x(t)$  на входе инерционного детектора,
- 2 - сигнал  $y(t)$  на выходе детектора,
- 3 - скорректированный сигнал  $z(t-2)$ , сдвинутый на 2 дискретных интервала влево,
- $n$  - номера дискретных отсчетов сигнала  $y(t)$ .

На рис. 3 представлены диаграммы сигналов: входного параметра  $x(t)$  инерционного ИП, сигнала  $y(t)$ , формируемого на его выходе, скорректированного сигнала  $z(t)$  с использованием описанного алгоритма коррекции. Входной параметр  $x(t)$  в данном случае представляет собой сумму двух гауссовых функций вида (7), смещенных друг относительно друга на интервал 0,02 с.

Ширина гауссовых функций составляет примерно 0,06 с. Алгоритм коррекции использует параболическую сплайн-аппроксимацию дискретных значений сигнала ИП, интервал дискретизации составляет 0,01 с. Скорректированный сигнал  $z(t)$ , так же как и в вышеописанном примере, запаздывает на два дискретных интервала относительно входного контролируемого параметра  $x(t)$ , его график для удобства сравнения на рис. 3 сдвинут влево на величину этого запаздывания. Из рассмотрения диаграмм видно, что динамическая погрешность инерционного ИП, в данном случае составляющая десятки процентов, с использованием описанного алгоритма коррекции снижается до нескольких процентов.

Необходимо иметь в виду, что при реализации описанного алгоритма в связи с использованием в нем процедуры дифференцирования при наличии периодической помехи на выходе схемы коррекции могут возникать шумы, интенсивность которых зависит от частотной полосы шумов. Однако в том случае, когда период дискретизации сигнала кратен периоду помехи, шумы не возникают, что характерно для большинства алгоритмов цифровой фильтрации.

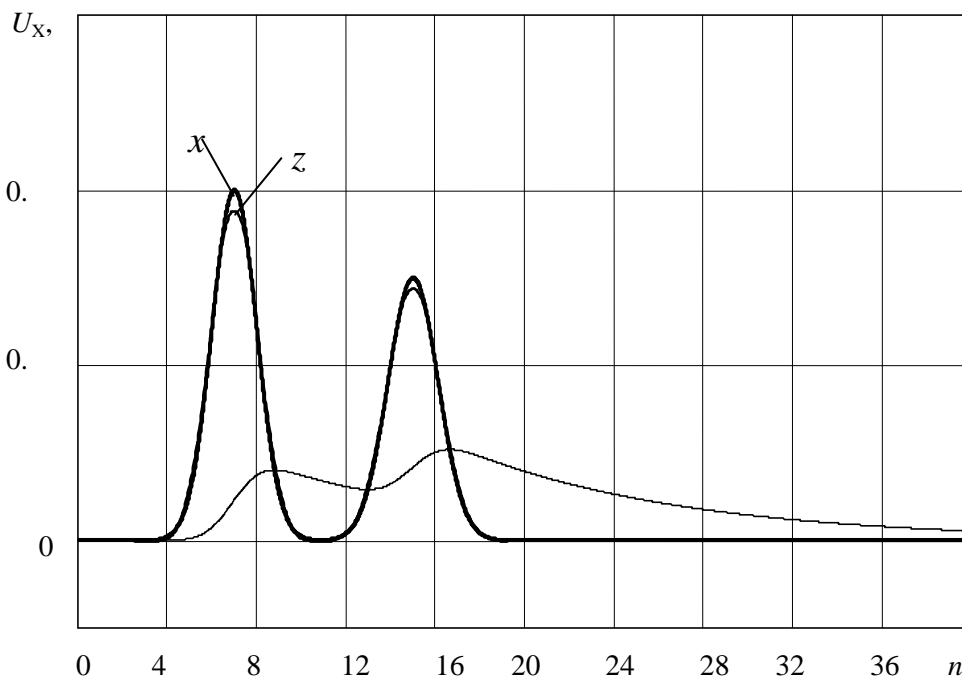


Рис. 3. Коррекция сигнала инерционного ИП, представляющего собой сумму двух гауссовых функций

Метод коррекции динамической погрешности инерционного ИП показывает хорошие результаты в случае, когда достаточно точно известна передаточная функция детектора, и если передаточная функция представляет собой аperiodическое звено первого порядка, то динамическая погрешность снижается в значительной степени. В принципе описанный подход коррекции динамической погрешности может быть применен и в том случае, когда передаточная функция детектора соответствует аperiodическому или колебательному звену второго порядка. Метод коррекции, описываемый выражениями (3) – (7), достаточно прост и может быть легко реализован современными микропроцессорными системами.

#### 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. труд. Самарского гос. тех. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2003. – Вып. 19. – С. 134-138.
3. Ланге П.К. Дифференцирующие цифровые фильтры со сплайн-аппроксимацией производной дискретизированных сигналов // Сб. труд. Самарского гос. тех. ун-та. Сер. Технические науки. – 2004. – Вып. 24. – С. 42-49.
4. Платонов И.А., Ланге П.К., Колесниченко И.Н., Платонов В.И. Динамические характеристики микродетектора теплопроводности для газоаналитических приборов // Измерительная техника. – 2015. – № 6. – С. 71-73.

Статья поступила в редакцию 1 февраля 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 the dynamic error of inertia sensor in several times. It is proposed to use the method described above also for the correction of the sensors signal, the operator function of which has 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.*