

Информационные технологии

УДК 621.372.542

КОРРЕКЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИНЕРЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИЕЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА

К.Л. Куликовский, П.К. Ланге

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

Рассмотрен метод коррекции динамической погрешности инерционных измерительных преобразователей с передаточной функцией 2-го порядка на основе коррекции аппаратной функции преобразователей с использованием сплайн – аппроксимации дискретных значений сигнала, а также его первой и второй производных.

Ключевые слова: *измерительный преобразователь, аппаратная функция, сплайн-аппроксимация, динамическая погрешность.*

Большинство измерительных преобразователей (ИП) характеризуется динамической погрешностью, которая, собственно, и определяет верхнюю границу их частотной характеристики. Динамическая погрешность существенно искажает получаемую с первичных измерительных преобразователей информацию. К таким преобразователям относятся различные термопреобразователи, акселерометры, электрохимические датчики гидрохимических параметров и т. д. Динамические измерительные преобразователи характеризуются передаточной функцией обычно первого или второго порядков.

В приборах для измерения анализа состава и свойств веществ (хроматографах, спектрометрах) наличие аппаратной функции вызывает уширение спектральных линий, в результате чего ухудшается разрешение таких пиков, близко расположенных друг к другу.

Аналогичная проблема возникает и при реализации многих других аналитических методов.

В хроматографических и электрохимических анализаторах, например, используются различного рода детекторы (первичные ИП), формирующие собственно аналитический сигнал в функции от времени и характеризующиеся инерционностью, что также вызывает расширение аналитических пиков и смещение их положений на спектрограмме.

Динамическая погрешность зависит от постоянных времени ИП, а также скорости изменения измеряемой величины и может быть скорректирована с использованием аппаратных и программных методов [1].

Константин Лонгинович Куликовский (д.т.н., проф.), профессор, каф. информационно-измерительной техники.

Петр Константинович Ланге (д.т.н., проф.), профессор, каф. информационно-измерительной техники.

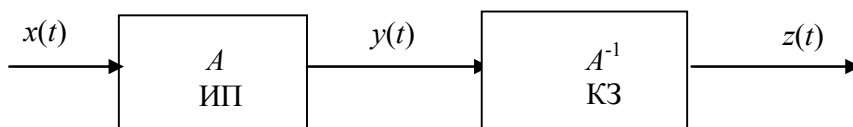
Применение аппаратных методов сопряжено с решением ряда проблем. Снижение динамической погрешности путем уменьшения постоянной времени ИП, как правило, снижает его надежность и долговременную стабильность. Кроме того, уменьшение инерционности ИП связано со значительными технологическими трудностями.

В связи с этим все большее распространение получает коррекция динамических погрешностей с использованием программных методов.

В ряде случаев коррекция динамической погрешности представляет собой обратную задачу [1], то есть задачу восстановления входного сигнала по известной информации об операторе A (аппаратной функции) ИП.

В частности, коррекция аппаратной функции ИП первого порядка на основе сплайн-аппроксимации дискретных значений измерительного сигнала и его производной рассмотрена в [2].

Рассмотрим задачу измерения мгновенных значений параметра $x(t)$, который преобразуется ИП в сигнал $y(t)$, формируемый на его выходе (рис. 1).



Р и с. 1. Структурная схема тракта прохождения сигнала

При динамических измерениях, как правило, интерес представляет не выходной сигнал ИП $y(t)$, а параметр $x(t)$. Поэтому задачей обработки результатов измерений является определение значений параметра $x(t)$ по выходному сигналу $y(t)$ и оператору A , описывающему динамические свойства ИП, что представляет собой решение задачи коррекции его аппаратной функции. Наиболее просто такая задача решается реализацией оператора A^{-1} , обратного оператору A , с использованием корректирующего звена КЗ (см. рис. 1) в аппаратном или программном виде, который обрабатывает сигнал $y(t)$. Однако по сущности своей такая задача является некорректной, поскольку обратный оператор должен реализовывать функцию предсказания сигнала, что физически реализовать невозможно [1].

В связи с этим корректное решение обратной задачи при измерениях динамических параметров может быть выполнено, если предусмотреть определенное запаздывание в формировании значений сигнала $z(t)$ на выходе корректирующего звена, что не требует реализации функции предсказания.

Рассмотрим коррекцию аппаратной функции преобразователей, имеющих передаточную функцию второго порядка вида

$$K(p) = \frac{K_0}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)},$$

где K_0 – статический коэффициент преобразования ИП, T_1, T_2 – постоянные времени ИП.

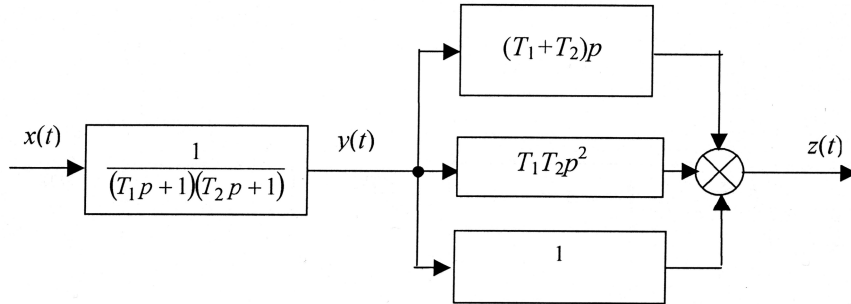
При $K_0=1$ передаточная функция корректирующего звена принимает вид

$$W^{-1}(p) = \frac{z(p)}{y(p)} = (T_1 p + 1)(T_2 p + 1) = T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1,$$

что соответствует реализуемому им дифференциальному уравнению

$$T_1 T_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = z(t). \quad (1)$$

Таким образом, это звено должно реализовать функцию одно- и двукратного дифференцирования сигнала $y(t)$ и сложения его производных с самим сигналом (рис. 2).



Р и с. 2. Структурная схема корректирующей цепи

Для решения такой задачи предлагается использовать цифровой фильтр, реализующий 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 (рис. 3)

$$y_n(t) = a_2 [n] t^2 + a_1 [n] t + a_0 [n], \quad (2)$$

где a_2 , a_1 , a_0 – коэффициенты аппроксимации.

Коэффициенты пятиточечной параболической сплайн-функции, аппроксимирующей сигнал $y(t)$ по его дискретным значениям, определяются следующими выражениями [2]:

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

Коэффициенты пятиточечной параболической сплайн-функции, аппроксимирующей производную сигнала $y(t)$, определяются выражениями [2]:

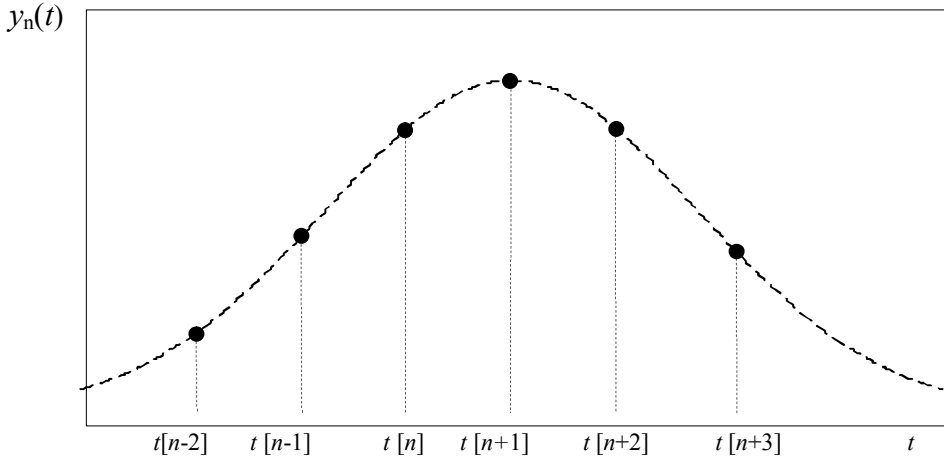
$$\left. \begin{aligned} b_0[n] &= \frac{1}{12} (y[n-2] - 8y[n-1] + 8y[n+1] - y[n+2]), \\ b_1[n] &= \frac{1}{6} (-y[n-2] + 10y[n-1] - 18y[n] + 10y[n+1] - y[n+2]), \\ b_2[n] &= \frac{1}{12} (-y[n-2] - 9y[n-1] + 22y[n] - 22y[n+1] + 9y[n+2] - y[n+3]). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Сплайн-аппроксимация второй производной сигнала $y(t)$ на n -м участке его дискретизации определяется выражением

$$y_n''(t) = d_2 [n] t^2 + d_1 [n] t + d_0 [n].$$

При использовании пятиточечного параболического сплайн-фильтра коэффициенты $d_2[n]$, $d_1[n]$, $d_0[n]$ записываются [3] в виде

$$\left. \begin{aligned} d_0[n] &= \frac{1}{4}(-y[n-2] + 2y[n] - y[n+2]), \\ d_1[n] &= \frac{2}{9}(-y[n-2] + 2y[n-1] - 2y[n+1] + y[n+2]), \\ d_2[n] &= \frac{1}{9}(y[n-2] - 3y[n-1] + 2y[n] + 2y[n+1] - 3y[n+2] + y[n+3]). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$



Р и с. 3. Аппроксимация выходного сигнала измерительного преобразователя параболической сплайн-функцией

Таким образом, сигнал $z_K(t)$ на выходе корректирующего фильтра на n -м интервале дискретизации описывается соотношениями

$$\begin{aligned} z_K(t) &= a_2[n] t^2 + a_1[n] t + (T_1 + T_2)(b_2[n] t^2 + b_1[n] t + b_0[n]) + \\ &+ T_1 T_2 (d_2[n] t^2 + d_1[n] t + d_0[n]) = (a_0[n] + (T_1 + T_2)b_2[n] + T_1 T_2 d_2[n]) t^2 + \\ &+ (a_1[n] + (T_1 + T_2)b_1[n] + T_1 T_2 d_1[n]) t + (T_1 + T_2)b_0[n] + T_1 T_2 d_0[n]. \end{aligned}$$

Следовательно, выходной сигнал $z_K(t)$ также определяется параболической сплайн-функцией

$$z_K(t) = c_2[n] t^2 + c_1[n] t + c_0[n], \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} c_2[n] &= a_2[n] + (T_1 + T_2)b_2[n] + T_1 T_2 d_2[n], \\ c_1[n] &= a_1[n] + (T_1 + T_2)b_1[n] + T_1 T_2 d_1[n], \\ c_0[n] &= a_0[n] + (T_1 + T_2)b_0[n] + T_1 T_2 d_0[n]. \end{aligned}$$

Как видно из (6), дискретные значения этого сигнала определяются выражением

$$z_{K0}[n] = a_0[n] + (T_1 + T_2)b_0[n] + T_1 T_2 d_0[n]. \quad (7)$$

Из (5) следует, что сигнал $z_K(t)$ формируется с запаздыванием в три дискретных интервала.

Аналогичным образом могут быть определены выражения (7) и при использовании параболических сплайн-функций, определенных на четном числе точек дискретизации, например четырехточечных сплайн-функций.

Свойства разработанных корректирующих сплайн-фильтров удобно рассмотреть на основе анализа их частотных характеристик.

Частотные характеристики сплайн-фильтров, аппроксимирующих значения сигнала, а также его первой и второй производных, определяются из выражений для (3), (4) и (5) для коэффициентов a_0 , b_0 , c_0 соответственно при использовании их Z -преобразований и при подстановке $z^n = e^{j\omega n}$:

$$a_0(j\omega) = \frac{5 - 4 \cos \omega - \cos 2\omega}{8},$$

$$b_0(j\omega) = j \frac{8 \sin \omega - \sin 2\omega}{6},$$

$$d_0(j\omega) = \frac{1 - \cos 2\omega}{2}.$$

Амплитудно-частотная характеристика корректирующего фильтра в этом случае определяется выражением

$$K_K(j\omega) = R(\omega) + jI(\omega),$$

где

$$R(\omega) = \frac{5 + 4T_1T_2}{8} - \frac{\cos \omega}{2} - \frac{1 + 4T_1T_2}{8} \cos 2\omega, \quad I(\omega) = \frac{T_1 + T_2}{6} (8 \sin \omega - \sin 2\omega).$$

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) корректирующего фильтра определяется выражением

$$\varphi_K(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{I(\omega)}{R(\omega)}.$$

Качество коррекции гармонического сигнала удобно оценивать частотными характеристиками всей цепи преобразования, состоящей из детектора аналитического сигнала и корректирующего фильтра. АЧХ такой цепи

$$K_\Sigma(\omega) = K_D(\omega)K_K(\omega),$$

где $K_D(\omega)$ – АЧХ инерционного измерительного преобразователя:

$$K_D(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (T_1\omega)^2} \cdot \sqrt{1 + (T_2\omega)^2}}.$$

В качестве примера можно привести АЧХ всей цепи преобразования сигнала для случая, когда детектор представляет собой аperiodическое звено второго порядка (1) для постоянных времени детектора $T_1=10$, $T_2=20$ и использования пятиточечных и четырехточечных параболических сплайн-фильтров. Графики таких характеристик в зависимости от относительной частоты \bar{f} ($\bar{f} = 1/N$, где N – число интервалов дискретизации на периоде гармонического сигнала) приведены на рис. 4.

Из рассмотрения этого рисунка видно, что использование корректирующего преобразования на основе параболических сплайн-фильтров позволяет в несколько раз расширить частотный диапазон преобразования сигнала в случае, когда детектор аналитического прибора представляет собой инерционное аperiodическое звено второго порядка.

Качество восстановления формы реальных измерительных сигналов необходимо рассмотреть на примере сигналов определенной формы. Известно, что реальные аналитические параметры $x(t)$, преобразуемые инерционным ИП в сигнал $y(t)$, во

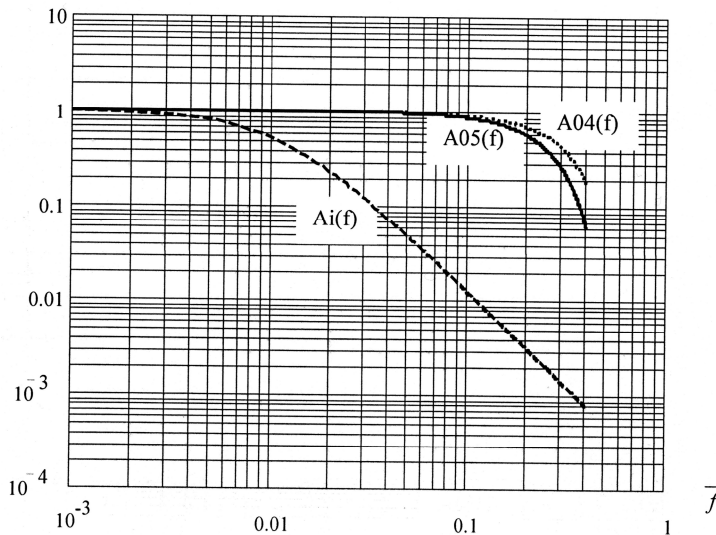
многих случаях представляют собой симметричные пики колоколообразной формы. В связи с этим представляет интерес задача восстановления формы таких пиков с помощью описанных выше алгоритмов.

Рассмотрим в качестве примера прохождение через инерционный детектор аналитического прибора единичного сигнала гауссовой формы

$$x(t) = \exp\left[-\frac{t-5}{1.5}\right].$$

Весовая функция ИП, имеющего передаточную функцию (1) второго порядка, определяется выражением

$$k(t) = \frac{1}{T_1 - T_2} \left[\exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) - \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right] \cdot 1(t). \quad (8)$$



Р и с. 4. Амплитудно-частотные характеристики всей цепи преобразования для детектора сигнала, представляющего собой апериодическое звено второго порядка: $Ai(f)$ – апериодического звена второго порядка; $A04(f)$ – всей цепи преобразования сигнала при использовании в корректирующем фильтре четырехточечной сплайн-функции; $A05(f)$ – всей цепи преобразования сигнала при использовании в корректирующем фильтре пятиточечной сплайн-функции

При входном сигнале $x(t)$ гауссовой формы (8) сигнал $y(t)$ на выходе детектора анализатора определяется функцией свертки

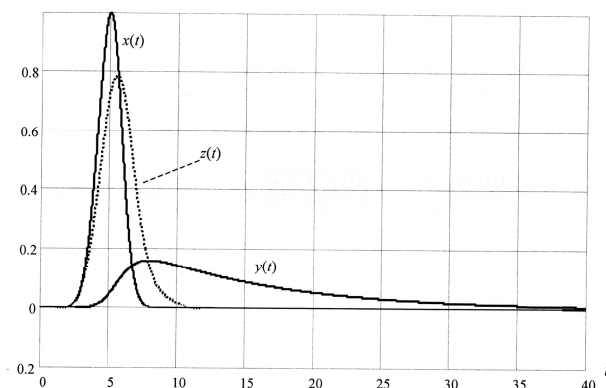
$$y(t) = \frac{1}{T_1 - T_2} \int_0^t \exp\left[\frac{-(t-\tau-5)^2}{1.5}\right] \cdot \left[\exp\left(-\frac{\tau}{T_1}\right) - \exp\left(-\frac{\tau}{T_2}\right) \right] \cdot 1(\tau) d\tau.$$

Оценка возможностей работы корректирующего фильтра второго порядка при использовании вышеописанного алгоритма сплайн-аппроксимации сигнала $y(t)$, его первой и второй производных осуществляется аналогичным образом.

При постоянных времени измерительного преобразователя ИП $T_1=10$ и $T_2=1$ графики входного сигнала $x(t)$, его выходного сигнала $y(t)$ и сигнала на выходе корректирующего фильтра $z(t)$ для пятиточечного алгоритма сплайн-аппроксимации сигнала $y(t)$ и его производной приведены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что разработанный алгоритм корректирующей цифровой фильтрации достаточно эффективно восстанавливает по форме сигнал $x(t)$, действующий на входе инерционного детектора. Запаздывание скорректированного сиг-

нала $z(t)$ относительно нескорректированного $x(t)$ составляет 3 дискретных интервала. Для удобства восприятия это запаздывание не отражено на рис. 5. Корректирующий сплайн-фильтр восстанавливает форму пика сигнала с погрешностью порядка 20 %.



Р и с. 5. Коррекция сигнала $x(t)$ гауссовой формы, искаженного инерционным преобразователем, имеющим передаточную функцию второго порядка:
 $y(t)$ – сигнал на выходе детектора; $z(t)$ – скорректированный сигнал

Таким образом, использование сплайн-аппроксимации измерительного сигнала, формируемого инерционными измерительными преобразователями, позволяет снизить их динамические погрешности и тем самым восстановить аналитические сигналы, действующие на их входах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Солопченко Г.Н. Обратные задачи в измерительных процедурах // Измерение, контроль, автоматизация. – М: ЦНИИТЭИприборостроения. – 1983. – Вып. 2(46). – С. 32-46.
2. Ланге П.К., Карпова Н.Е. Аппроксимативные методы коррекции динамической погрешности // Датчики и системы. – Ин-т проблем управления РАН. – М: 2001. – №12. – С. 10-12.
3. Ланге П.К. Дифференцирующие цифровые фильтры дискретизированных сигналов со сплайн-аппроксимацией их второй производной // Тематич. сборник науч. трудов «Информационно-измерительные и управляющие системы». Самара: Поволж. регион. науч.-техн. центр Метрологической академии РФ. 2003. – Вып. 12. – С. 43-51.

Статья поступила в редакцию 2 ноября 2011 г.

CORRECTION OF THE DYNAMIC ERROR OF THE INERTIAL SENSORS HAVING THE SECOND ORDER TRANSFER FUNCTION

K.L. Kulikovskij, P.K. Lange

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

In article is considered a method for the dynamic error correction of the inertial sensors having the second order transfer function on the basis of the correction of the sensor instrumental function using a spline-approximation of the discrete values of the signal and its first and second derivatives.

Keywords: *sensor, instrumental function, spline approximation, dynamic error.*

*Konstantin L. Kulikovskij (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
 Petr K. Lange (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*