

Информационные технологии

УДК 621.372.542

КОРРЕКЦИЯ АППАРАТНОЙ ФУНКЦИИ НЕЛИНЕЙНОГО ИНЕРЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

П.К. Ланге, Н.М. Дингуатов

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

Рассмотрена задача коррекции аппаратной функции инерционного измерительного преобразователя, имеющего апериодическую передаточную функцию, а также коррекции нелинейности его монотонной характеристики.

Ключевые слова: коррекция, инерционный измерительный преобразователь, аппаратная функция, сплайн-аппроксимация.

Многие измерительные преобразователи ИП (например, датчики температуры, электрохимические датчики, датчики плотности) характеризуются инерционностью, определяемой их передаточной функцией. Кроме того, такие датчики характеризуются также нелинейностью характеристики, обычно монотонной. Погрешность нелинейности часто принимает максимальное значение в верхней части диапазона измерения, что собственно и ограничивает применение датчиков в соответствии с их метрологическими характеристиками.

В связи с этим представляется актуальной задача коррекции аппаратной функции инерционного ИП, а также коррекции нелинейности его характеристики.

Аналогичная проблема возникает и при создании анализаторов состава и свойств веществ.

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

Такие детекторы представляют собой обычно апериодическое звено первого или второго порядка и при преобразовании аналитического пика формируют измерительный сигнал, описываемый интегралом Дюамеля:

$$y = \int_0^{\tau} x(t - \tau)k(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где $x(t)$ – функция, описывающая истинный аналитический пик;

$k(t)$ – импульсная характеристика детектора аналитического сигнала;

τ – переменная интегрирования.

*Петр Константинович Ланге – д.т.н., профессор.
Николай Максutowич Дингуатов – аспирант.*

Постоянная времени детекторов, используемых в аналитических приборах, лежит в пределах от долей секунды до нескольких десятков секунд. В ряде случаев такие детекторы существенно искажают форму и положение аналитических пиков. В настоящее время эта проблема становится все более острой в связи с появлением анализаторов со временем анализа, составляющим несколько десятков секунд.

Задача коррекции аппаратной функции получила название обратной задачи [1, 2], коррекции аппаратной функции [3], коррекции динамической погрешности [4] и фактически является задачей восстановления сигнала $x(t)$ по выходному сигналу $y(t)$, формируемому ИП либо анализатором в целом, и его оператору, определяемому, например, импульсной характеристикой преобразователя.

Задача коррекции аппаратной функции первого порядка с использованием параболической сплайн-аппроксимации дискретных значений сигнала, а также его производной была рассмотрена в [5].

При решении этой задачи корректировалась аппаратная функция инерционного измерительного преобразователя, соответствующая аperiodической функции первого порядка

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{K}{Tp + 1}, \quad (2)$$

где T – постоянная времени ИП, K – его коэффициент передачи (для упрощения принимается $K=1$).

Коррекция осуществлялась с использованием обратной функции

$$W^{-1}(p) = \frac{z(p)}{y(p)} = Tp + 1. \quad (3)$$

Для решения этой задачи отыскивались коэффициенты параболической сплайн-аппроксимации дискретных значений скорректированного сигнала (сигнала на выходе корректирующего фильтра)

$$z(t) = c_2[n]t^2 + c_1[n]t + c_0[n],$$

где n – номера дискретных отсчетов сигнала.

Для определения значений c_2 , c_1 , c_0 предварительно определялись коэффициенты параболической аппроксимации дискретных значений $y(n)$ сигнала на выходе ИП с помощью цифрового фильтра, реализующего выражения:

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

Коэффициенты b_0 , b_1 , b_2 параболической аппроксимации производной сигнала на выходе ИП определялись с помощью цифрового фильтра, реализующего выражения:

$$\left. \begin{aligned} b_0[n] &= \frac{1}{12}(y[n-2] - 8y[n-1] + 8y[n+1] - y[n+2]); \\ b_1[n] &= \frac{1}{6}(-y[n-2] + 10y[n-1] - 18y[n] + 10y[n+1] - y[n+2]); \\ b_2[n] &= \frac{1}{12}(y[n-2] - 9y[n-1] + 22y[n] - 22y[n+1] + 9y[n+2] - y[n+3]). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В этом случае коэффициенты параболической сплайн-аппроксимации дискретных значений скорректированного сигнала (сигнала на выходе корректирующего фильтра) определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} c_0[n] &= a_0[n] + T \cdot b_0[n]; \\ c_1[n] &= a_1[n] + T \cdot b_1[n]; \\ c_2[n] &= a_2[n] + T \cdot b_2[n]. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Разработанный алгоритм осуществляет достаточно хорошую коррекцию измерительного сигнала, имеющего вид гауссовой функции. Сигнал на выходе корректирующего звена имеет запаздывание в три интервала дискретизации относительно сигнала на выходе ИП, что соответствует возможности физической реализации обратной функции (3) с целью решения задачи коррекции.

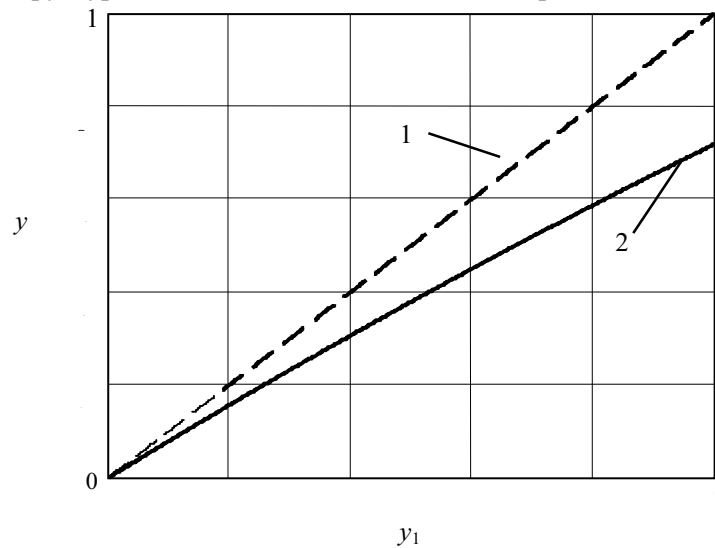
Рассмотрим возможность использования разработанного алгоритма коррекции аппаратной функции с одновременной коррекцией нелинейности характеристики ИП.

Для значительной группы ИП характерно проявление нелинейности в верхней части диапазона измерения. Такие преобразователи имеют характеристику вида, представленного на рис. 1, где 1 – характеристика идеального (линейного) ИП, 2 – нелинейная характеристика реального ИП (с погрешностью нелинейности порядка 30%), она может быть аппроксимирована функцией

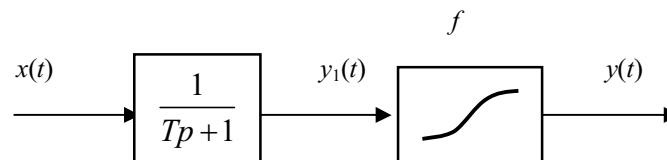
$$y = f(y_1) = y_1 - k_H \cdot y_1^2, \quad (7)$$

где k_H – коэффициент нелинейности.

При этом структурная схема ИП может иметь вид, представленный на рис. 2.

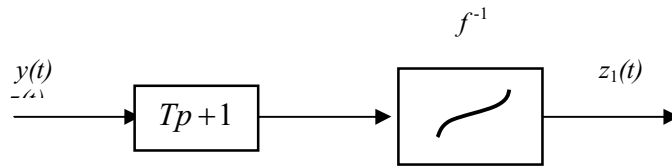


Р и с . 1. Характеристика нелинейного измерительного преобразователя



Р и с . 2. Структурная схема нелинейного инерционного измерительного преобразователя

Коррекция нелинейности характеристики ИП осуществляется с использованием обратной, «выпрямляющей» функции $f^{-1}(x)$; коррекция его инерционности осуществляется с использованием обратной функции (рис. 3), как это было описано выше.



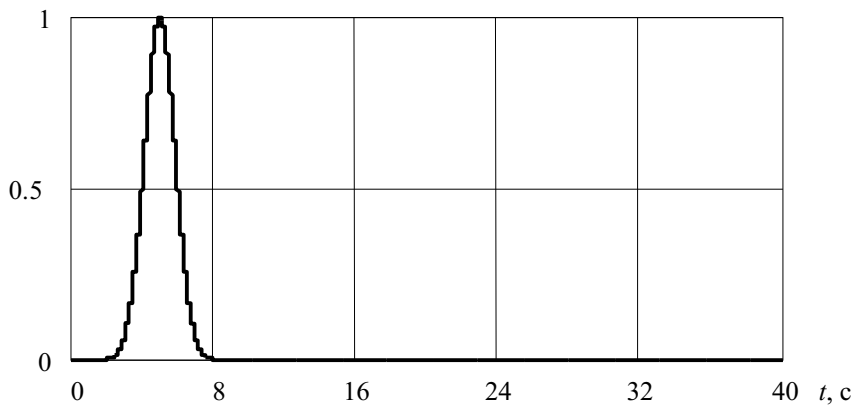
Р и с . 3. Структурная схема корректирующего звена

Рассмотрим в качестве примера прохождение через ИП единичного сигнала гауссовой формы (рис. 4):

$$x(t) = 1 \cdot \exp\left[-\frac{(t - T_{\Gamma})^2}{D}\right], \quad (8)$$

где $T_{\Gamma} = 5\text{с}$ – положение пика сигнала на оси времени;

$D = 1,5\text{с}^2$ – параметр ширины пика сигнала гауссовой формы.



Р и с . 4. Сигнал гауссовой формы на входе ИП

Сигнал $y'(t)$ на выходе ИП с учетом динамической погрешности выражается зависимостью

$$y_1(t) = \frac{1}{T} \int_0^t \exp\left(\frac{-t - \tau - T_{\Gamma}}{D}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{T_{\Gamma}}\right) d\tau,$$

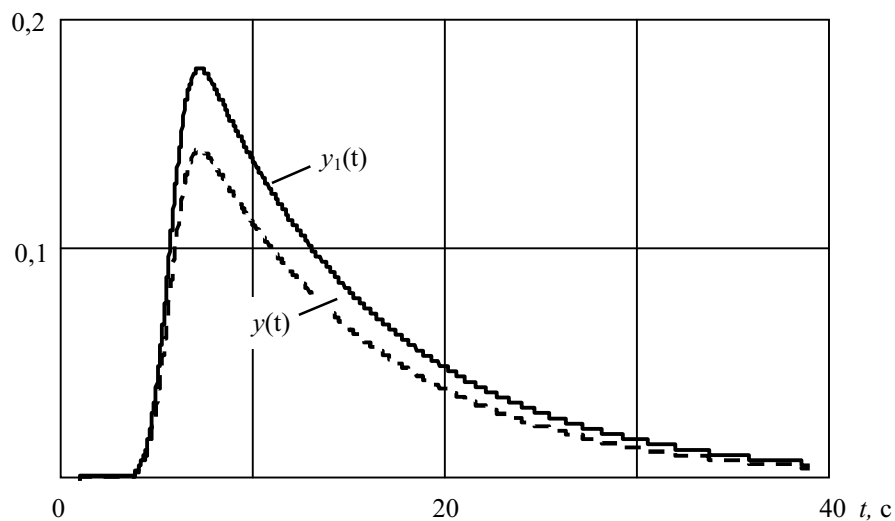
где T – постоянная времени ИП, в данном примере равная 10 с.

Сигнал $y(t)$ на выходе ИП определяется с учетом погрешности от нелинейности функции преобразования. В конкретном примере $k_{\text{н}} = 0,3$, что определяет погрешность нелинейности характеристики порядка 30%.

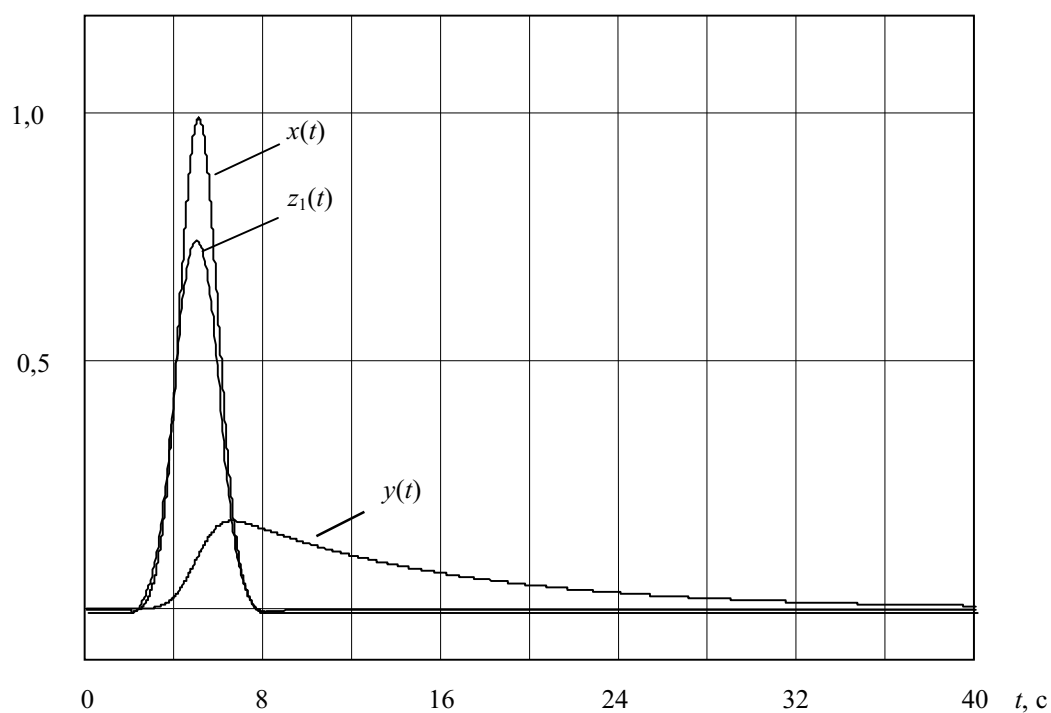
Сигнал $y(t)$ на выходе ИП, имеющего передаточную функцию (2) с учетом динамической погрешности, а также погрешности от нелинейности функции преобразования, представлен на рис. 5.

При постоянной времени $T = 10\text{с}$ нелинейного ИП графики входного сигнала $x(t)$, его выходного сигнала $y(t)$ и сигнала на выходе корректирующего фильтра $z_1(t)$

для пятиточечного алгоритма сплайн-аппроксимации сигнала $y(t)$ без коррекции нелинейности характеристики преобразователя приведены на рис. 6.



Р и с . 5. Сигнал $y(t)$ на выходе ИП с учетом динамической погрешности, а также погрешности от нелинейности функции преобразования, при $k_H=0,3$ (погрешность нелинейности порядка 30%)



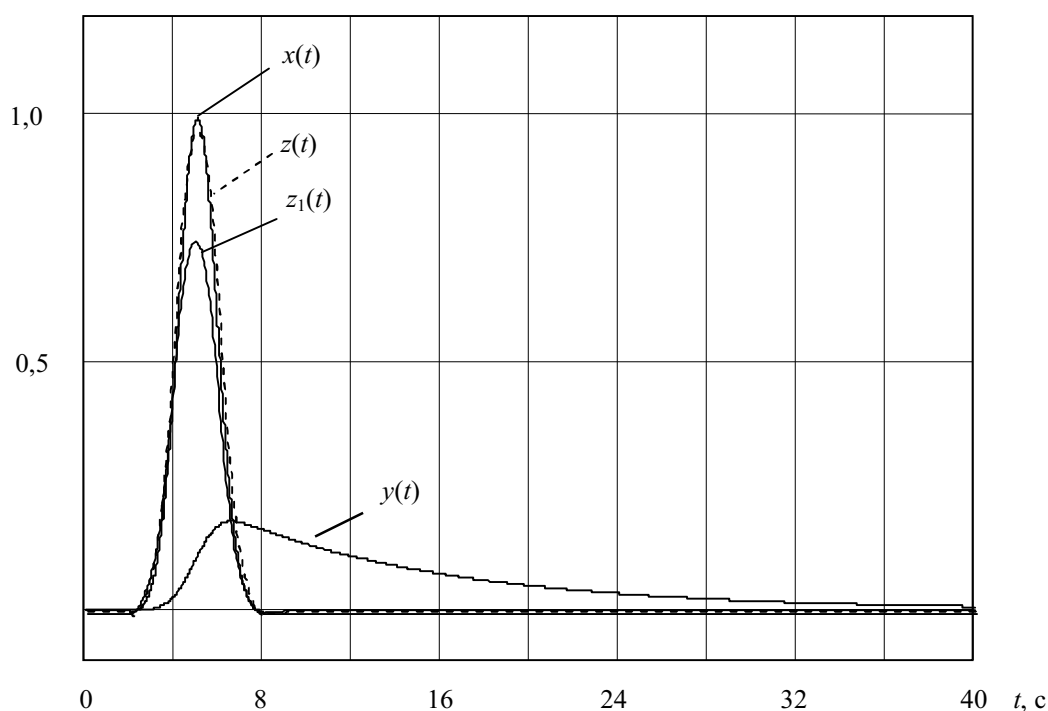
Р и с . 6. Коррекция аппаратной функции нелинейного ИП при $T=10$ с:
 $x(t)$ – входной сигнал детектора; $y(t)$ – выходной сигнал детектора;
 $z_1(t)$ – сигнал на выходе корректирующей цепи

Как видно из рассмотрения этого рисунка, цифровой фильтр эффективно восстанавливает форму сигнала, действующего на входе ИП, однако нелинейность его характеристики вызывает появление значительной погрешности восстановления амплитуды пика входного сигнала.

Для более эффективного восстановления сигнала необходимо скорректировать нелинейность характеристики с использованием корректирующего звена, схема которого изображена на рис. 3. При этом используется корректирующая функция вида

$$z = f^{-1}(z_1) = z_1 + k_2 \cdot z_1^2,$$

где k_2 – коэффициент, определяемый исходя из минимальной погрешности нелинейности статической характеристики всей цепи преобразования сигнала.

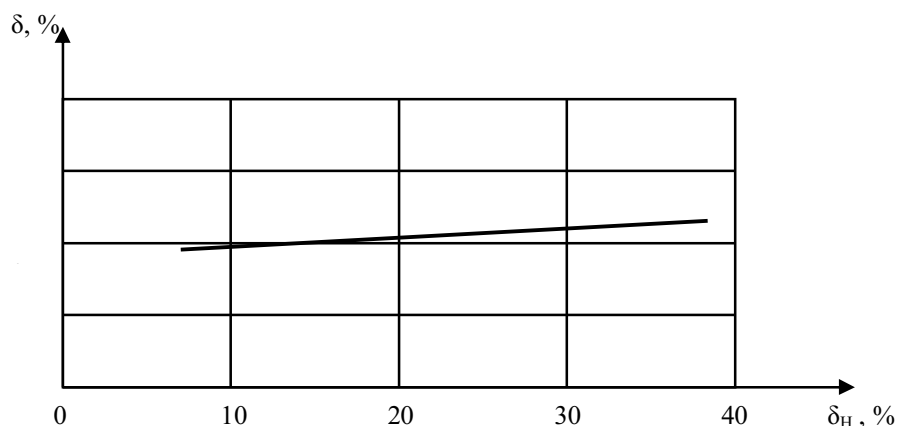


Р и с . 7. Коррекция аппаратной функции ИП и нелинейности его характеристики при $T=10$ с и погрешности нелинейности характеристики ИП 30%:
 $x(t)$ – входной сигнал детектора; $y(t)$ – выходной сигнал детектора;
 $z_1(x)$ – сигнал на выходе корректирующей цепи

Из рассмотрения этого рисунка видно, что погрешность восстановления остается на уровне порядка 10% при значительной нелинейности характеристики измерительного преобразователя.

Графики входного сигнала $x(t)$, его скорректированного сигнала $z_1(t)$ и сигнала на выходе корректирующего фильтра $z(t)$ для пятиточечного алгоритма сплайн-аппроксимации сигнала приведены на рис. 7.

Как видно из рассмотрения этого рисунка, сигнал восстанавливается по форме и амплитуде с погрешностью порядка 10%.



Р и с . 8. Зависимость погрешности восстановления сигнала от погрешности нелинейности

На рис. 8 представлена зависимость погрешности восстановления сигнала от погрешности δ_N нелинейности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Василенко Г.И.* Теория восстановления сигналов. О редукции к идеальному прибору в физике и технике. – М.: Сов. радио, 1979. – 269 с.
2. *Марчук Г.И., Дробышев Ю.П.* Некоторые вопросы линейной теории измерений // *Автоматрия*. – 1967. – №3. – С. 24-30.
3. *Харченко Р.Р.* Коррекция динамических характеристик электроизмерительных приборов и преобразователей // *Приборостроение*. – 1956. – №2. – С. 21-26.
4. *Солопченко Г.Н.* Обратные задачи в измерительных процедурах // *Измерения. Контроль. Автоматизация*. – М.: ЦНИИТЭИП, 1983. – №2 (46). – С. 34-49.
5. *Ланге П.К.* Коррекция динамической погрешности измерительных преобразователей на основе сплайн-аппроксимации сигнала // *Известия Самар. науч. центра РАН*. – Самара: Самарский науч. центр РАН. – Т.5. – №2. – 2003. – С. 162-168.

Статья поступила в редакцию 17 марта 2011 г.

UDC 621.372.542

CORRECTION OF TRANSFER FUNCTION OF THE INERTIAL NONLINEAR SENSOR

P.K. Lange, N.M. Dinguatov

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

The problem of correction of transfer function of the inertial sensor having aperiodic transfer function, and also corrections of nonlinearity of its monotonous characteristic are considered.

Keywords: *correction, inertial sensor, transfer function, spline approximation.*

*P.K. Lange – Doctor of Technical Sciences, Professor.
N.M. Dinguatov – Postgraduate student.*