К. т. н. В. В. РЕДЬКО

Украина, г. Киев, ОО «Сейм-93»
E-mail: blist2002@mail.ru

УДК 621.3.088.7

Дата поступления в редакцию
25.07 2011 г.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИЗБЫТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ИЗМЕРЯЕМОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДАТЧИКА

Рассмотрены вопросы повышения точности измерений физических величин при использовании измерительного канала с нелинейной градуировочной характеристикой.

Научно-техническая задача создания методов повышения точности измерения физических величин (**ФВ**) при использовании измерительных каналов с нелинейными градуировочными характеристиками была и остается актуальной. Сложность этой задачи обусловлена тем, что одновременно с линеаризацией градуировочной характеристики необходимо уменьшить погрешность измерений, связанную с изменением условий их проведения. Данная составляющая систематической погрешности измерений вызвана отклонением в одну сторону от установленного значения какого-либо из параметров, характеризующих условия измерений [1].

В измерительной технике для линеаризации градуировочной характеристики и коррекции систематической погрешности измерений широко применяются методы, которые основаны на получении избыточной информации — дополнительной информации не только об измеряемой физической величине, но и о погрешностях, допускаемых при измерениях. Такие методы получили название «алгоритмические методы автоматической коррекции погрешностей» [2, 3]. Среди них наиболее обширной группой являются методы избыточных измерений [4], возникшие в результате эволюции методов образцовых мер и тестовых методов.

При выборе того или иного подхода к получению информационной избыточности на передний план выступают вопросы, связанные с возможностью его физической реализации. Одной из встречающихся на практике проблем является невозможность прекращения воздействия искомой физической величины на чувствительный элемент датчика (первичного измерительного преобразователя).

Целью настоящей работы является создание математической модели процесса избыточных измерений при непрерывном воздействии измеряемой физической величины на чувствительный элемент датчика.

Математическая модель градуировочной характеристики измерительного канала

В [5, 6] отмечается, что в качестве обобщенной математической модели встречающихся на практике градуировочных характеристик измерительных каналов может быть принята функция преобразования (**ФП**) вида

$$y = y_0 + S_л x + S_{н1} x^2 + ... + S_{нn} x^{n+1}, \qquad (1)$$

где x — измеряемая физическая величина; y — выходная величина измерительного канала; y_0, $S_л$, $S_{н1}$, ..., $S_{нn}$ — параметры ФП; n — степень полинома.

Известно, что когда градуировочная характеристика измерительного канала описывается полиномом высокой степени, требуется проведение значительного числа промежуточных измерений. Это приводит к росту погрешности, вызванной изменением значения измеряемой физической величины в процессе избыточных измерений. В связи с этим в [5] рекомендуется использовать кусочно-параболическую аппроксимацию градуировочной характеристики, которая позволяет снизить степень аппроксимирующего полинома увеличением числа аппроксимирующих парабол вида $y = y_0 + S_л x + S_н x^2$. Однако данный подход нельзя признать универсальным по следующей причине. Залогом успешного решения задачи автоматической коррекции погрешностей является выбор оптимальных значений корректирующих величин. Если диапазон значений измеряемой ФВ разбивается на несколько поддиапазонов, то каждому из них будут соответствовать свои оптимальные значения корректирующих физических величин. Следовательно, реализация методов избыточных измерений будет возможна только при наличии многозначной меры или магазина мер.

Ввиду этого представляется целесообразным не разбивать диапазон значений измеряемой физической величины на поддиапазоны, но ограничиться в ФП (1) четырьмя первыми членами. В этом случае для физической реализации метода избыточных измерений потребуются лишь три однозначные меры и масштабный измерительный преобразователь. С учетом этого примем математическую модель градуировочной характеристики измерительного канала в виде

$$y = S_{н2} x^3 + S_{н1} x^2 + S_л x + y_0.$$

Тогда реальную функцию преобразования измерительного канала можно записать следующим образом:

$$y = S'_{\text{н}2}x^3 + S'_{\text{н}1}x^2 + S'_{\text{л}}x + y'_0\,, \qquad (2)$$

где $S'_{\text{н}2}$, $S'_{\text{н}1}$, $S'_{\text{л}}$, y'_0 — параметры реальной ФП, учитывающие влияние дестабилизирующих факторов на измерительный канал.

При этом значения параметров реальной ФП определяются как

$$\{S'_{\text{н}2}\}=\{S_{\text{н}2}\}(1+\gamma_{\text{н}2});\ \ \{S'_{\text{н}1}\}=\{S'_{\text{н}1}\}(1+\gamma_{\text{н}1});$$
$$\{S'_{\text{л}}\}=\{S_{\text{л}}\}(1+\gamma_{\text{л}});\ \ \{y'_0\}=\{y_0\}(1+\gamma_{y0}),$$

где $\{S_{\text{н}2}\}$, $\{S_{\text{н}1}\}$, $\{S_{\text{л}}\}$, $\{y_0\}$ — номинальные значения параметров ФП; $\gamma_{\text{н}1}$, $\gamma_{\text{н}1}$, $\gamma_{\text{л}}$, γ_{y0} — относительные изменения значений параметров ФП, обусловленные процессами старения, а также влиянием дестабилизирующих факторов на измерительный канал.

Математическая модель процесса избыточных измерений

Анализ ФП (2) показал, что решение задачи автоматической коррекции погрешностей возможно при использовании группы из шести корректирующих физических величин (**КрФВ**) x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 и x_6 со следующими значениями: $\{x_1\}=\{x\}$, $\{x_2\}=\{x\}+\{x_{\text{м}1}\}$, $\{x_3\}=\{x\}+\{x_{\text{м}2}\}$, $\{x_4\}=\{x\}+\{x_{\text{м}3}\}$, $\{x_5\}=\{x\}/k_{\text{л}1}$, $\{x_6\}=k_{\text{л}1}\{x\}$. Здесь $\{x_{\text{м}1}\}$, $\{x_{\text{м}2}\}$, $\{x_{\text{м}3}\}$ — нормированные значения физических величин, воспроизводимых мерами ($\{x_{\text{м}1}\}=\{x_0\}+\{\Delta x_0\}$, $\{x_{\text{м}2}\}=\{x_0\}$, $\{x_{\text{м}3}\}=\{x_0\}+\{\Delta x_0\}$); $k_{\text{л}1}$ — первый коэффициент локальной линеаризации. Следует отметить, что в соответствии с теорией избыточных измерений [4] значения $\{x_2\}$, $\{x_3\}$ и $\{x_4\}$ образуют арифметическую прогрессию, а $\{x_1\}$, $\{x_5\}$ и $\{x_6\}$ — геометрическую.

Если измерения искомой ФВ x проводятся методом избыточных измерений первого рода, то систему когерентных нелинейных уравнений связи между величинами можно представить в виде

$$\left.\begin{aligned}
y_1 &= S'_{\text{н}2}x_1^3 + S'_{\text{н}1}x_1^2 + S'_{\text{л}}x_1 + y'_0,\\
y_2 &= S'_{\text{н}2}x_2^3 + S'_{\text{н}1}x_2^2 + S'_{\text{л}}x_2 + y'_0,\\
y_3 &= S'_{\text{н}2}x_3^3 + S'_{\text{н}1}x_3^2 + S'_{\text{л}}x_3 + y'_0,\\
y_4 &= S'_{\text{н}2}x_4^3 + S'_{\text{н}1}x_4^2 + S'_{\text{л}}x_4 + y'_0,\\
y_5 &= S'_{\text{н}2}x_5^3 + S'_{\text{н}1}x_5^2 + S'_{\text{л}}x_5 + y'_0,\\
y_6 &= S'_{\text{н}2}x_6^3 + S'_{\text{н}1}x_6^2 + S'_{\text{л}}x_6 + y'_0.
\end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Решение этой системы относительно искомой ФВ x представлено уравнениями избыточных измерений (4)—(8), где $x_{\text{д}}$— действительное значение физической величины x; k_1=1; k_2=2.

Физический смысл приведенной математической модели состоит в следующем. Сначала на вход измерительного канала подается искомая физическая величина x ($\{x_1\}=\{x\}$), которая подвергается измерительному преобразованию в ФВ y_1. Затем с помощью первой меры формируется ФВ $x_{\text{м}1}$, значение которой с заданной точностью равно $\{x_{\text{м}1}\}=\{x_0\}-\{\Delta x_0\}$. Данная ФВ поступает на вход измерительного канала одновременно с искомой ФВ x. Корректирующая ФВ x_2, значение которой равно сумме значений физических величин $x_{\text{м}1}$ и x ($\{x_2\}=\{x\}+\{x_0\}-\{\Delta x_0\}$), подвергается измерительному преобразованию в физи-

$$\frac{x_0^2(y_2+y_4-k_2y_3)+x_0\Delta x_0(y_2-y_4)+k_2\Delta x_0^2(y_3-y_1)}{k_2x_0\Delta x_0^2(x_0^2-\Delta x_0^2)}\left(\frac{k_1}{k_{\text{л}1}}-k_{\text{л}1}\right)=$$
$$=\frac{x_{\text{д}}^2(k_{\text{л}1}^2-k_1)(k_{\text{л}1}-k_1)(y_3-y_1)-x_0\left(k_{\text{л}1}^2[(k_{\text{л}1}-k_1)x_{\text{д}}-x_0](y_1-y_5)+[k_{\text{л}1}(x_{\text{д}}+x_0)-x_{\text{д}}](y_6-y_1)\right)}{x_{\text{д}}^2x_0(k_{\text{л}1}-k_1)[k_{\text{л}1}(x_{\text{д}}+x_0)-x_{\text{д}}][(k_{\text{л}1}-k_1)x_{\text{д}}-x_0]}; \qquad (4)$$

$$S_{\text{н}2\text{д}}=\frac{k_2\Delta x_0^2(y_3-y_1)+x_0\Delta x_0(y_2-y_4)+x_0^2(y_2+y_4-k_2y_3)}{k_2x_0\Delta x_0^2(x_0^2-\Delta x_0^2)}; \qquad (5)$$

$$S_{\text{н}1\text{д}}=k_{\text{л}1}\frac{y_6-y_1-k_{\text{л}1}(y_1-y_5)}{x_{\text{д}}^2(k_{\text{л}1}-k_1)^2(k_{\text{л}1}+k_1)}-x_{\text{д}}\left(k_{\text{л}1}+\frac{k_1}{k_{\text{л}1}}+k_1\right)\frac{k_2\Delta x_0^2(y_3-y_1)+x_0\Delta x_0(y_2-y_4)+x_0^2(y_2+y_4-k_2y_3)}{k_2x_0\Delta x_0^2(x_0^2-\Delta x_0^2)}; \qquad (6)$$

$$S_{\text{лд}}=\frac{k_{\text{л}1}^2(y_1-y_5)-(y_6-y_1)}{x_{\text{д}}(k_{\text{л}1}-k_1)^2}+x_{\text{д}}^2\left(k_{\text{л}1}+\frac{k_1}{k_{\text{л}1}}+k_1\right)\frac{k_2\Delta x_0^2(y_3-y_1)+x_0\Delta x_0(y_2-y_4)+x_0^2(y_2+y_4-k_2y_3)}{k_2x_0\Delta x_0^2(x_0^2-\Delta x_0^2)}; \qquad (7)$$

$$y_{0\text{д}}=\frac{k_{\text{л}1}[k_{\text{л}1}^2y_5-y_1(k_{\text{л}1}+k_1)]+y_6}{(k_{\text{л}1}-k_1)^2(k_{\text{л}1}+k_1)}-x_{\text{д}}^3\frac{k_2\Delta x_0^2(y_3-y_1)+x_0\Delta x_0(y_2-y_4)+x_0^2(y_2+y_4-k_2y_3)}{k_2x_0\Delta x_0^2(x_0^2-\Delta x_0^2)}. \qquad (8)$$

ческую величину y_2. Аналогичным образом при помощи второй и третьей мер осуществляется формирование КрФВ x_3 и x_4 с их последующим измерительным преобразованием в ФВ y_3 и y_4 соответственно.

Далее искомая физическая величина подается на вход масштабного измерительного преобразователя, обеспечивающего формирование КрФВ x_5, которая затем поступает на вход измерительного канала и подвергается измерительному преобразованию в ФВ. Аналогичным образом осуществляется формирование КрФВ x_6 и ее измерительное преобразование в ФВ y_6.

Полученные результаты промежуточных измерений обрабатываются в соответствии с уравнением избыточных измерений (4), из которого не сложно определить действительное значение $\{x_д\}$ искомой ФВ x. Поскольку в уравнение избыточных измерений (4) не входят параметры ФП измерительного канала, становится очевидным, что оно обеспечивает автоматическую коррекцию погрешности измерений из-за изменения условий измерений. При этом также достигается линейная зависимость между значением измеряемой физической величины $\{x\}$ и результатом избыточных измерений $\{x_д\}$.

Полученная математическая модель процесса избыточных измерений может также быть использована при решении задачи оценивания метрологической надежности средств измерений [4]. Решение такой задачи осуществляется путем обработки результатов промежуточных измерений по уравнениям избыточных измерений (5) — (8), которые позволяют определить действительные значения $\{S_{н2д}\}$, $\{S_{н1д}\}$, $\{S_{лд}\}$ и $\{y_{0д}\}$ параметров ФП измерительного канала. Контролируя изменения этих параметров за время измерений, можно сделать выводы о воздействии дестабилизирующих факторов на средство измерения, а контролируя их изменения за интервал времени, соизмеримый со средним сроком службы, можно судить о деградации измерительного канала и средства измерения в целом.

Таким образом, разработанная математическая модель процесса избыточных измерений позволяет определить действительные значения параметров функции преобразования измерительного канала на момент его изготовления и в процессе эксплуатации.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. РМГ 29-99. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.— М.: ИПК. Изд-во стандартов, 2000. [RMG 29-99. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii. Metrologiya. Osnovnye terminy i opredeleniya. Moscow. IPK. Izd-vo standartov, 2000]

2. Земельман М. А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств.— М.: Изд-во стандартов, 1972. [Zemel’man M. A. Avtomaticheskaya korrektsiya pogreshnostei izmeritel’nykh ustroistv. Moscow. Izd-vo standartov, 1972]

3. Кондратов В. Т. Методы и средства линеаризации градуировочных характеристик датчиков и средств измерений. Часть 3. Методы аппроксимации характеристик, методы образцовых мер, итерационные и тестовые методы / Препринт. Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова НАНУ.— Киев, 1998. [Kondratov V. T. / Preprint. In-t kibernetiki im. V. M. Glushkova NANU. Kiev, 1998]

4. Кондратов В. Т. Фундаментальная теория избыточных измерений: особенности и обобщенная структура // Законодательная и прикладная метрология.— 2009.— № 4 (104).— С. 2—15. [Kondratov V. T. // Zakonodatel’naya i prikladnaya metrologiya. 2009. N 4 (104). P. 2]

5. Бромберг Э. М., Куликовский К. Л. Тестовые методы повышения точности измерений.— М.: Энергия, 1972. [Bromberg E. M., Kulikovskii K. L. Testovye metody povysheniya tochnosti izmerenii. Moscow. Energiya, 1972]

6. Семенов Л. А., Сирая Т. Н. Методы построения градуировочных характеристик средств измерений.— М.: Изд-во стандартов, 1986. [Semenov L. A., Siraya T. N. Metody postroeniya graduirovochnykh kharakteristik sredstv izmerenii. Moscow. Izd-vo standartov, 1986]