

УДК 621.3.088.7

## АВТОКАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ПО ВХОДУ КАНАЛА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

© 2012 Л. Э. Вилоп

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассматривается автокалибровка канала преобразования электрических величин по двухэлементному имитатору выходной электрической величины датчика в измерительной системе с нелинейными датчиками.

*Автокалибровка, автоматическая коррекция погрешности измерительной системы, нелинейный датчик.*

После градуировки измерительного канала по входу датчика при условии неизменности параметров окружающей среды в погрешности измерения отсутствует дополнительная погрешность. Очевидно, что если градуировку измерительного канала производить автоматически перед каждым измерением, то в погрешности измерения составляющая дополнительной погрешности будет отсутствовать. Этот процесс получил название автокалибровки или автоматической коррекции погрешностей.

Однако, автокалибровка по входу датчика (по входу измерительного канала) может быть реализована только в тех случаях, когда есть возможность отключения измеряемой величины от входа измерительного канала и подключения вместо неё многозначной меры измеряемой величины. Примером такой системы с однозначной мерой является весоизмерительная система, в которой перед каждым или перед несколькими взвешиваниями производится отсчёт выходного кода АЦП в отсутствии взвешиваемого груза. При последующем вычитании этого кода из кода, получаемого при взвешивании, устраняется (до известного предела, определяемого погрешностью квантования) аддитивная составляющая погрешности измерения. Таким же образом, отсчётом выходного кода АЦП при нулевом нагружении удаётся уменьшить аддитивную составляющую погрешности измерительной системы для прочностных испытаний [1].

В большинстве же случаев даже такая

аддитивная автокалибровка по входу измерительного канала не представляется возможной, так как кроме проблемы отключения-подключения измеряемой величины существует ещё проблема наличия в измерительном устройстве меры измеряемой величины требуемой точности и удобства её воздействия на датчики, например, на датчики температуры.

Поэтому в современных многоканальных (многоточечных) измерительных системах (рис. 1) с коммутацией измерительных каналов по входу общего для всех датчиков канала преобразования электрических величин (КПЭВ), включающего в себя нормализатор, схему питания измерительных цепей и АЦП, по возможности, используют автокалибровку по мере, воспроизводящей значе-

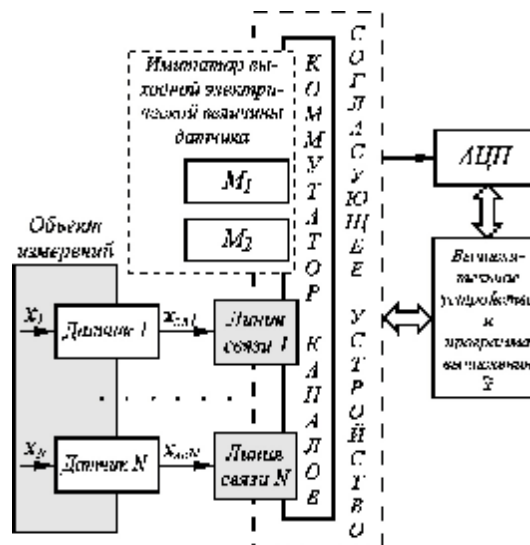


Рис. 1. Функциональная схема измерительной системы с автокалибровкой по входу КПЭВ

ния выходной электрической величины датчика в точках градуировки. Для этого в коммутатор каналов вводят дополнительные калибровочные каналы, посредством которых выходы такого прецизионного имитатора выходной электрической величины (ИВЭВ) датчика периодически или по внешней команде подключаются ко входу КПЭВ для получения калибровочных значений цифровых кодов на выходе АЦП, записываемых в память вычислительного устройства. Естественно, что в этом случае датчик оказывается неохваченным автокалибровкой и его погрешность ( $\Delta_{дат}$ ) входит в погрешность измерения ( $\Delta_x$ ) измеряемой величины  $x$ , но погрешность КПЭВ ( $\delta_{КПЭВ}$ ), за исключением погрешности квантования ( $\Delta_{кв}$ ), исключается из погрешности измерения полностью, то есть:

$$D_x = D_{дат} + D_{ИД} + D_{кв}, \quad (1)$$

где  $\Delta_{ИД}$  – погрешность, вносимая в результат измерения имитатором выходной электрической величины датчика (мерой сопротивлений, напряжений и т.д.). Хотя, в таких системах как весоизмерительная и система для прочностных испытаний [1], есть возможность исключить из погрешности измерения аддитивную составляющую погрешности всего канала преобразования, включая датчик.

Функция преобразования КПЭВ современных измерительных систем с точностью до погрешности квантования практически линейна. Поэтому при линейной функции преобразования датчика значение измеряемой величины  $x$  (оценка  $\tilde{x}$ ) может быть вычислено по формуле, получаемой (рис. 2) из подобия прямоугольных треугольников  $ABC$  и  $ADE$ :  $\frac{CA}{BC} = \frac{EA}{DE}$  или  $\frac{x - x_1}{n - n_1} = \frac{x_2 - x_1}{n_2 - n_1}$ .

Откуда значение оценки  $\tilde{x}$ :

$$\tilde{x} = (n - n_1) \frac{x_2 - x_1}{n_2 - n_1} + x_1, \quad (2)$$

где  $n$  – текущее значение выходного кода АЦП;  $x_1$  и  $x_2$  – точки градуировки, значения  $x$ , соответствующие, как правило, минимальному и максимальному значению из-

меряемой величины;  $n_1$  и  $n_2$  – соответствующие точкам градуировки значения выходных кодов АЦП.

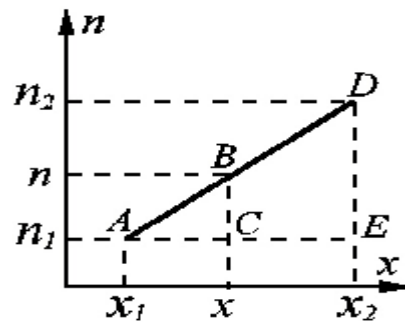


Рис. 2. К определению  $x$  при линейном датчике

Если для получения кодов  $n_1$  и  $n_2$  использовать опрос калибровочных каналов по мерам  $M_1$  и  $M_2$  имитатора выходной электрической величины используемых в системе датчиков, а значения  $x_1$  и  $x_2$  определить по функции обратной функции преобразования датчиков, используемых в системе ( $x_1 = x_{M_1} = f_{дат}^{-1}(M_1)$  и  $x_2 = x_{M_2} = f_{дат}^{-1}(M_2)$ ), и внести их при настройке измерительной системы в память вычислительного устройства, то необходимость в процедуре градуировки системы отпадает и значение измеряемой величины  $x$  вычисляется по формуле:

$$\tilde{x} = (n - n_{M_1}) \frac{x_{M_2} - x_{M_1}}{n_{M_2} - n_{M_1}} + x_{M_1}, \quad (3)$$

где  $n_{M_1}$  и  $n_{M_2}$  – значения выходных кодов АЦП, получаемые при опросе мер  $M_1$  и  $M_2$  имитатора выходной электрической величины датчика.

При нелинейной функции преобразования датчика (рис. 3) для уменьшения влияния нелинейности на погрешность измерения в современных измерительных системах используют кусочно-линейную аппроксимацию функции преобразования, при которой помимо точек градуировки  $x_{min}$  и  $x_{max}$  производят градуировку в точках  $x_i$  внутри

диапазона изменения измеряемой величины. При этом погрешность аппроксимации уменьшается с увеличением числа точек градуировки до известного предела, обусловленного погрешностью квантования используемого в системе АЦП.

Значение измеряемой величины  $\tilde{x}$  в этом случае вычисляется по формуле, аналогичной формуле (2):

$$\tilde{x} = (n - n_i) \frac{x_{i+1} - x_i}{n_{i+1} - n_i} + x_i, \quad (4)$$

где интервал  $(n_i, n_{i+1})$  при работе системы определяется программным путём по текущему значению кода  $n$  на выходе АЦП.

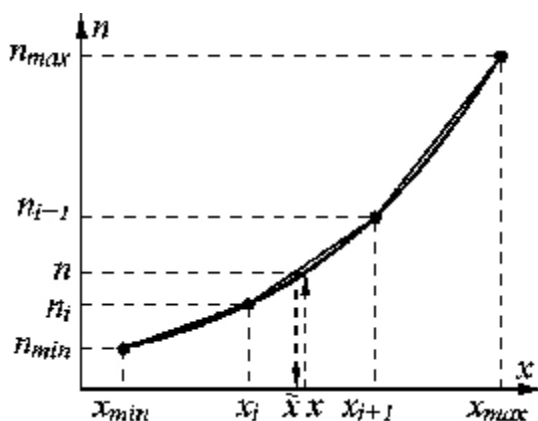


Рис. 3. К определению  $\tilde{x}$  при нелинейном датчике

Автокалибровка по входу КПЭВ в этом случае требует применения в системе многозначной меры выходной электрической величины датчика [2], воспроизводящей все точки градуировки  $(x_{min}, \dots, x_i, \dots, x_{max})$ . Такая многозначная мера вследствие технологических отклонений  $M_i$  от номинальных значений может внести в результат измерения свою погрешность нелинейности, а кроме того, большое число используемых в имитаторе выходной электрической величины датчика прецизионных элементов увеличивает стоимость и массогабаритные характеристики устройства.

Двухзначную меру  $M_1$  и  $M_2$  в ИВЭВ при нелинейной функции преобразования датчика можно использовать, если аддитивную составляющую погрешности КПЭВ ис-

ключать по мере  $M_1$ , путем вычитания калибровочного кода  $n_{M_1}$  из текущего кода  $n$ , а для исключения мультипликативной составляющей погрешности КПЭВ стабилизировать его коэффициент преобразования по разности результатов опроса  $n_{M_2} - n_{M_1}$  путём изменения одного из параметров КПЭВ, например, тока питания терморезисторного датчика или опорного напряжения АЦП. Такой подход требует введения в измерительную систему схемы с корректирующим цифроаналоговым преобразователем.

Вместе с тем, в структуре системы с автокалибровкой по двум значениям  $M_1$  и  $M_2$  можно ничего не менять при переходе от датчика с линейной функцией преобразования к датчику с нелинейной функцией преобразования, например, при увеличении диапазона измеряемых температур платиновым терморезистором или термопарным датчиком. Такое заключение основывается на том, что под воздействием дестабилизирующих факторов изменяются только параметры КПЭВ, функция преобразования которого линейна. Характер нелинейности датчика при этом остаётся неизменным, и её влияние сводится к пренебрежимо малой величине кусочно-линейной аппроксимацией, а аддитивные и мультипликативные изменения функции преобразования датчика всё равно не охватываются автокалибровкой по входу КПЭВ и в соответствии с формулой (1) входят в погрешность измерения  $D_x$ .

В соответствии с рис. 4 для значения выходного кода АЦП в любой  $i$ -й точке градуировки можно записать:

$$n_i = S_i(x_i - x_{min}) + n_{min}, \quad (5)$$

где  $S_i = \frac{n_i - n_{min}}{x_i - x_{min}}$ . Умножив и разделив  $S_i$

на разность значений выходной электрической величины датчика  $x_{\Delta i} - x_{\Delta min}$ , полу-

$$\text{чим: } S_i = \frac{x_{\Delta i} - x_{\Delta min}}{x_i - x_{min}} \frac{n_i - n_{min}}{x_{\Delta i} - x_{\Delta min}} = S_{\Delta i} S_{\Delta i},$$

где  $S_{\Delta i} = \frac{x_{\Delta i} - x_{\Delta min}}{x_i - x_{min}}$  и  $S_{\Delta i} = \frac{n_i - n_{min}}{x_{\Delta i} - x_{\Delta min}}$  –

некоторые интегральные коэффициенты

преобразования, соответственно, датчика и КПЭВ на интервале  $(x_{min}, x_i)$ .

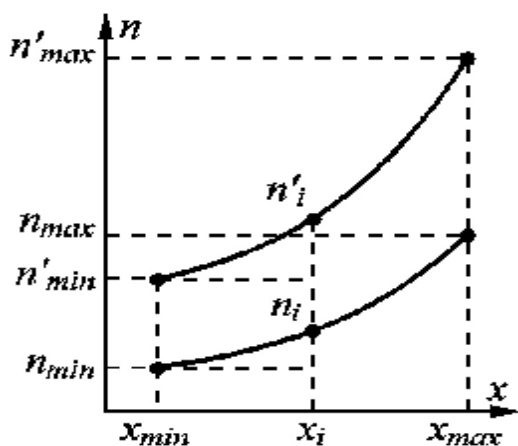


Рис. 4. К определению откорректированных значений отсчётов  $n'_i$

Вследствие того, что функция преобразования КПЭВ линейна, значение  $S_{\partial i}$  неизменно на всём интервале  $(x_{\partial min}, x_{\partial max})$  и может быть определено как:

$$S_{\partial} = \frac{n_{max} - n_{min}}{x_{\partial max} - x_{\partial min}}.$$

Тогда формулу (5) можно записать в виде:

$$n_i = S_{\partial i} S_{\partial} (x_i - x_{min}) + n_{min}. \quad (6)$$

Под воздействием дестабилизирующих факторов значения  $S_{\partial i}$ , как отмечено выше, остаются неизменными, а значение  $S_{\partial}$  и значения кодов  $n_i$ ,  $n_{min}$  и  $n_{max}$  на выходе АЦП изменяются и становятся равными  $S'_{\partial}$ ,  $n'_i$ ,  $n'_{min}$  и  $n'_{max}$ . Тогда формулу (6) можно записать в виде:

$$n'_i = S_{\partial i} S'_{\partial} (x_i - x_{min}) + n'_{min}, \quad (7)$$

где  $S'_{\partial} = \frac{n'_{max} - n'_{min}}{x_{\partial max} - x_{\partial min}}$ . Умножив и разделив первое слагаемое в правой части формулы (7) на  $S_{\partial}$ , можем записать:

$$n'_i = S_{\partial i} S_{\partial} (x_i - x_{min}) \frac{S'_{\partial}}{S_{\partial}} + n'_{min},$$

$\frac{S'_{\partial}}{S_{\partial}} = \frac{n'_{max} - n'_{min}}{n_{max} - n_{min}}$ , а в соответствии с форму-

лой (6)  $S_{\partial i} S_{\partial} (x_i - x_{min}) = n_i - n_{min}$ . Тогда окончательное выражение для расчёта значений отсчётов  $n'_i$ , скорректированных по результатам опроса  $M_1$  и  $M_2$ , принимает вид:

$$n'_i = (n_i - n_{min}) \frac{n'_{max} - n'_{min}}{n_{max} - n_{min}} + n'_{min}. \quad (8)$$

Таким образом, при использовании датчиков с нелинейной функцией преобразования в измерительной системе с автокалибровкой по имитатору выходной электрической величины датчика с двумя значениями меры  $M_1$  и  $M_2$ , градуировка с использованием внешней многозначной меры выходной электрической величины датчика в точках  $x_i$  внутри диапазона является обязательной процедурой. При этом для получения отсчётов  $n_{min}$  и  $n_{max}$  используются меры  $M_1$  и  $M_2$ , для которых по функции, обратной функции преобразования датчика, определяются значения точек градуировки  $x_{min} = f_{\partial am}^{-1}(M_1)$  и  $x_{max} = f_{\partial am}^{-1}(M_2)$ .

Значения отсчетов  $(n_{min}, \dots, n_i, \dots, n_{max})$ , полученные при градуировке системы, используются для расчёта по формуле (8) скорректированных значений отсчётов  $(n'_{min}, \dots, n'_i, \dots, n'_{max})$  после каждого опроса калибровочных каналов с мерами  $M_1$  и  $M_2$ , проводимого для получения значений  $n'_{min}$  и  $n'_{max}$ . Вместе с точками градуировки  $(x_{min}, \dots, x_i, \dots, x_{max})$  значения отсчётов  $(n_{min}, \dots, n_i, \dots, n_{max})$  должны храниться в памяти вычислительного устройства в течение всего времени эксплуатации измерительной системы до проведения следующей градуировки, в процессе которой они будут обновлены.

Значение измеряемой величины  $\tilde{x}$  при эксплуатации измерительной системы с такой автокалибровкой определяется по формуле, аналогичной (4):

$$\tilde{x} = (n - n'_i) \frac{x_{i+1} - x_i}{n'_{i+1} - n'_i} + x_i, \quad (9)$$

где  $n$  – текущее значение выходного кода

АЦП;  $n'_i$  и  $n'_{i+1}$  – значения отсчётов в точках градуировки, скорректированные по формуле (8).

#### **Библиографический список**

1. Вилоп, Л. Э. Измерительная система для прочностных испытаний элементов авиационных конструкций [Текст] / Л. Э. Вилоп // Перспективные информа-

ционные технологии для авиации и космоса (ПИТ-2010): избр. тр. Междунар. конф. с элементами науч. школы для молодежи. – Самара: Изд-во СГАУ, 2010. – С. 34-37.

2. Алиев, Т. М. Автоматическая коррекция погрешностей цифровых измерительных приборов [Текст] / Т. М. Алиев, Л. Р. Сейдель. – М.: Энергия, 1975. – 216 с.

### **AUTOCALIBRATION MEASURING CHANNEL ON THE INPUT CHANNEL CONVERSION ELECTRIC VALUES**

© 2012 L. E. Vilop

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

Considered autocalibration channel conversion of electrical quantities in two-element simulator output power value of the sensor in the measuring system with nonlinear sensors.

*Automatic calibration, automatic error correction measurement system, the nonlinear sensor.*

#### **Информация об авторах**

**Вилоп Леонард Эдуардович**, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [vilsgau@mail.ru](mailto:vilsgau@mail.ru). Область научных интересов: схемотехника и метрология измерительных систем и устройств.

**Vilop Leonard Eduardovich**, candidate of technical sciences, assistant professor at the Department of information systems and technology, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [vilsgau@mail.ru](mailto:vilsgau@mail.ru). Area of scientific: the circuit design and metrology measuring systems and devices.