

# ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

---

УДК 681.51

*В.А. Багацкий, А.В. Багацкий*

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ НА ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЯХ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ

**Ключевые слова:** погрешности средств измерения и контроля, передаточные функции, преобразование погрешностей.

### Введение

В процессах измерения, контроля, распознавания, технической диагностики, счета, используемых в информационно-измерительной технике, имеются общие черты. Все эти процессы обязательно включают восприятие техническими средствами исследуемых (измеряемых, контролируемых) величин, ... сравнение их опытным путем с известными величинами, ... формирование и выдачу результатов в виде именованных чисел, их отношений, суждений, основанных на количественных соотношениях [1].

В настоящее время измерение электрических и неэлектрических величин выполняется с помощью каналов аналого-цифрового преобразования, которые состоят из схем аналогового кондиционирования сигналов и аналого-цифровых преобразователей (АЦП) электрических величин в цифровой код. Схемы кондиционирования согласуют входной диапазон АЦП с выходными диапазонами электрических сенсоров или преобразуют неэлектрические величины в электрические с необходимым для АЦП диапазоном входных сигналов. Кроме того, схемы кондиционирования уменьшают влияние помех и наводок на входные цепи преобразователя.

Погрешности измерения, которые обычно нормируются для аналого-цифровых каналов, можно классифицировать по причинам их возникновения и способам проявления. Для разработчиков измерительных электронных схем важны причины возникновения погрешностей, а метрологи в большей степени изучают способы проявления погрешностей, т.е. измерительный канал представляется как «черный ящик» и изучается передаточная характеристика канала.

Достоверность измерений можно оценивать их погрешностями.

Рассмотрим случай, когда определяющими погрешностями канала являются систематические погрешности АЦП.

### Погрешности преобразования и причины их возникновения

В Украине с точки зрения метрологии погрешности АЦП нормируются стандартом ДСТУ-3744 – 98 «Перетворювачі вимірювальні напруги та струму цифрові» [2], который принят в качестве межгосударственного в бывшем СНГ, а в России введен как ГОСТ 30605-98 с 2004 года.

© В.А. БАГАЦКИЙ, А.В. БАГАЦКИЙ, 2021

В соответствии с этим ГОСТом номинальная передаточная функция аналого-цифрового преобразователя с «идеальными» элементами выражается в виде соотношения

$$N_m = Ent[(x + 0,5h) / h]. \quad (1)$$

Здесь  $N_m$  — выходной цифровой код преобразователя;  $Ent$  — символ, определяющий целую часть числа;  $x$  — значение входной преобразуемой величины;  $h$  — номинальная ступень шага квантования в единицах преобразуемой величины (разрешающая способность АЦП).

Выражение  $0,5h$  смещает номинальную передаточную функцию преобразования на половину шага квантования для того, чтобы она проходила через нуль и конечную точку заданного диапазона преобразования.

Символ  $Ent$  округляет непрерывную величину, стоящую справа от него, до меньшего целого значения. Поэтому номинальная функция преобразования имеет по оси  $N_m$  погрешность округления, которая равна единице младшего разряда выходного цифрового кода.

График номинальной передаточной функции и погрешностей для четырехразрядного АЦП непрерывной величины  $x$  в цифровой двоичный код  $N_m$  приведен на рис. 1. Входной диапазон  $x$  равен  $0 \dots 15$  V. Номинальная передаточная функция имеет ступенчатый характер.

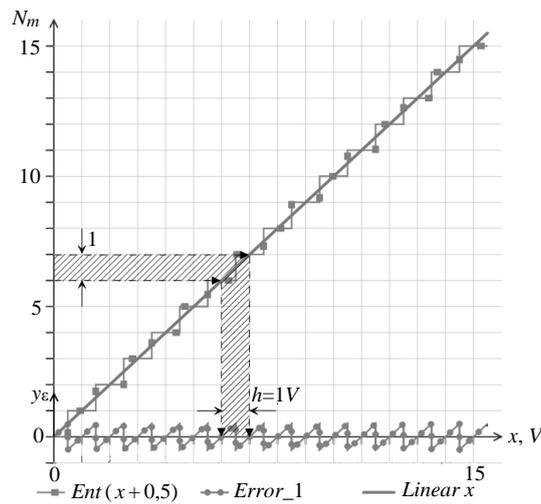


Рис. 1

Если на вход АЦП с «идеальными» элементами подавать линейно изменяющуюся в допустимом диапазоне образцовую непрерывную величину  $Linear\ x$ , а с выхода считывать код  $N_m$ , то расчет погрешности  $y$  выполняется по формуле

$$y_E = x - h \cdot Ent[(x + 0,5h)h]. \quad (2)$$

На рис. 1 начальная часть ординаты от  $-1$  до  $+1$  отображает непрерывную величину. Погрешность  $Error\ 1$  изменяется так, как показано на рис. 1, т.е. пилообразно, с периодом  $h$  [3], который называется погрешностью квантования по уровню или квантом. Внутри кванта погрешность изменяется линейно.

При поступлении на вход неизвестной величины и ее преобразовании в цифровой код  $N_m$  закон изменения погрешности внутри кванта неизвестен. Известно только то, что погрешность не превышает ступень шага квантования  $h$ . На рис. 1

показано, как погрешность из-за ограниченного количества цифровых разрядов АЦП преобразуется на передаточной функции преобразования в погрешность квантования по уровню  $h$ .

Если аппроксимировать ступенчатую передаточную характеристику прямой линией *Linear*  $x$ , то погрешность из-за ограниченного количества разрядов будет преобразовываться в погрешность квантования аналогичным образом.

Если диапазоны изменения входной непрерывной величины и выходного цифрового кода нормировать к максимальным значениям, то максимальные значения входного и выходного диапазонов будут равны единицам. Тогда интегральный коэффициент усиления линеаризованной передаточной характеристики будет также равен единице. Это значит, что относительные погрешности по осям  $x$  и  $N_m$  равны.

В работе рассмотрены только систематические погрешности АЦП.

В АЦП с реальными элементами существуют инструментальные погрешности, зависящие от большого количества различных факторов. Для удобства анализа погрешностей они разделены по причинам их возникновения на четыре группы [4].

1. Погрешности, зависящие от разброса характеристик компонентов между корпусами микросхем АЦП при их изготовлении и старении. В каждом отдельном преобразователе эти погрешности являются систематическими; они проявляются через погрешности смещения нуля и масштаба. Разброс характеристик компонентов внутри корпуса микросхемы приводит к погрешностям дифференциальной нелинейности, которые также относятся к систематическим. Если рассматривать партию изготовленных преобразователей, то погрешности производственного разброса случайны.

Погрешности из-за разброса параметров компонентов при изготовлении уменьшаются путем подстройки и подгонки их параметров.

2. Погрешности из-за неидеальных электрических характеристик реальных элементов в каждом отдельном преобразователе проявляются как систематические и уменьшаются путем улучшения параметров элементов. Эти погрешности могут приводить к изменениям величины кванта в каждой точке диапазона или к «пропаданию» кодов, которые проявляются как дифференциальная нелинейность [3, 5].

3. Погрешности, возникающие при изменении условий окружающей среды (температуры, влажности, радиации) и уровней питающих напряжений, являются дополнительными. Это систематические погрешности, которые уменьшаются с помощью специальных параметрических или следящих компенсирующих схем.

4. Погрешности, возникающие из-за собственных шумов компонентов (тепловой шум резисторов, фликкер-шум и дробовой шум транзисторов), малы по величине и учитываются только в специализированных высокоточных преобразователях.

Инструментальные и дополнительные погрешности искажают погрешность квантования по уровню и делают ее неравномерной по диапазону изменения входной величины или приводят к «пропаданию» выходных кодов [3, 5]. Полученная суммарная величина инструментальных и дополнительных погрешностей налагает ограничение на количество разрядов выходного кода АЦП, т.е. влияет на выбор погрешности квантования по уровню.

### **Контроль параметров**

Под контролем понимается процесс установления соответствия между состоянием объекта контроля и заданными нормами. В результате контроля определяется, к какой из нормированных, качественно различающихся областей относится рассматриваемое состояние объекта контроля [1].

В данной работе не обсуждается теоретический вопрос о том, какой процесс является первичным — измерение или контроль. С одной стороны, результат измерения в поразрядном преобразователе получаем путем последовательного применения операций контроля, а с другой стороны, результаты контроля в современных системах контроля получаем после последовательных измерений одного или нескольких параметров. Достаточно заметить, что эти процессы, как уже было отмечено, тесно связаны. Сравнение процессов измерения и контроля выполнено в [6] в предположениях, что контроль выполняется более точными устройствами, чем устройства измерения, и что известно распределение погрешностей измерительного устройства внутри кванта и оно не является равномерным. По мнению авторов, эти предположения в реальных условиях не выполняются.

Передаточная характеристика допускового контроля непрерывного параметра  $x$  представлена системой равенств

$$N_c(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x_{b\max} > x > x_{b\min}, \\ 0, & \text{если } x_{b\min} \geq x \geq x_{b\max}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $x$  — непрерывная контролируемая величина;  $x_{b\max}$ ,  $x_{b\min}$  — верхняя и нижняя допустимые границы изменения  $x$ ;  $N_c(x)$  — функция контроля.

Предположим, что контролируемая величина измеряется четырехразрядным аналого-цифровым преобразователем, а контроль осуществляется цифровым устройством путем сравнения четырехразрядных выходных цифровых кодов АЦП с заданными верхней и нижней границами. Нижняя граница равна 8 V, а верхняя — 14 V.

Погрешности квантования АЦП  $Error_2$  и передаточная характеристика цифрового устройства допускового контроля изображены на рис. 2.

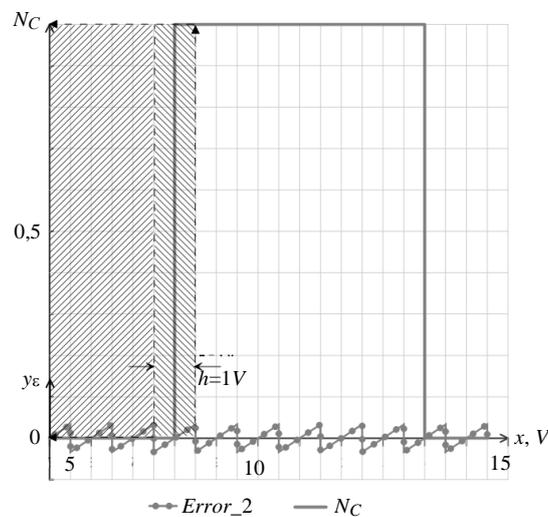


Рис. 2

На оси абсцисс графика изображена контролируемая непрерывная величина  $x$ , а по оси ординат указаны возможные цифровые выходные значения устройства контроля — 0 и 1.

Изображенная передаточная функция контроля является прямоугольным окном с номинальным значением 11 V и допустимыми значениями  $\pm 3$  V отклонений по диапазону контролируемой величины. Если входная непрерывная величина находится в пределах  $\pm 0,5$  V от границ кванта, то результаты контроля могут иметь погрешность 100 %, что показано на рис. 2.

Поэтому достоверность результатов контроля оценивается вероятностью верного срабатывания устройства контроля. Однако для этого необходимо знать форму распределения погрешностей внутри кванта.

Оценивание достоверности столь похожих процессов, как измерение и контроль, с помощью разных критериев представляется авторам нелогичным.

### **Цель работы**

Исследование влияния систематических погрешностей аналого-цифрового преобразователя на погрешности контроля параметров в зависимости от вида функций соответствия норме и величины окна контроля, а также выбор разрешающей способности АЦП для различных задач контроля.

### **Использование линейных и нелинейных функций в окнах контроля**

В приведенных выше передаточных функциях аналого-цифрового преобразователя и устройства контроля использованы ступенчатые функции, в графиках которых на оси ординат представлены цифровые величины. В устройствах допускового контроля на выходе существует два значения — 0 либо 1. Основным недостатком допускового контроля является то, что качественное изменение состояния контролируемого параметра или объекта по результатам контроля на краях окна может произойти при малейшем изменении контролируемого параметра.

Авторы предлагают оценивать состояние контролируемого параметра как инверсию модуля взвешенного отклонения контролируемой величины от ее номинального значения, где под инверсией понимается дополнение до единицы. При изменении контролируемого параметра в диапазоне допустимых отклонений эта величина представлена функцией соответствия норме (иначе — весовая функция в окне контроля), диапазон изменения которой по цифровой оси  $u_c$  находится от 0 до 1. Входные и выходные диапазоны АЦП также нормированы к единице.

Если контролируемая величина равна номинальному значению, то функция соответствия норме равна единице.

Если контролируемая величина находится между границами допустимых отклонений, но не равна номинальному значению, то функция соответствия может находиться в диапазоне от 1 до 0, в зависимости от величины отклонения от номинала.

Если контролируемая величина выходит за границы допустимых отклонений, то функция соответствия равна нулю.

Существует большое количество удовлетворяющих этим условиям функций [7], в середине окна которых коэффициент взвешивания равен единице, а по краям окна — нулю или близок к нулю. Рассмотрим некоторые из них.

### **Кусочно-линейная функция соответствия норме**

Предположим, что устройство контроля состоит из аналого-цифрового преобразователя и цифрового блока, который обрабатывает выходные цифровые отсчеты АЦП, и на выходе цифрового блока формируется результат контроля в виде многоразрядного числа. На рис. 3 изображены линеаризованная передаточная функция АЦП  $u_m$  и кусочно-линейная функция соответствия норме цифрового устройства контроля  $u_{c1}$ . Эта простейшая кусочно-линейная треугольная функция, состоящая из двух отрезков, которые соединяют номинальное значение функции с границами допустимых отклонений, называется функцией Бартлетта [7]. Аналитически эта функция представлена системой равенств (изменяется в диапазоне от 1 до 0)

$$y_{cl}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x = x_{nom}, \\ a_1 \cdot x + b_1, & \text{если } x_{b \min} < x < x_{nom}, \\ a_2 \cdot x + b_2, & \text{если } x_{nom} \leq x \leq x_{b \max}, \\ 0, & \text{если } x_{b \max} < x < x_{b \min}. \end{cases} \quad (4)$$

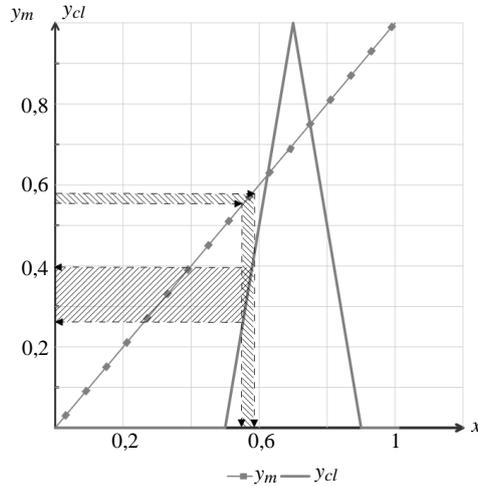


Рис. 3

Известны выражения для постоянных коэффициентов  $a$  и  $b$  из (4). Они определяются по координатам двух точек.

$$a = -y_1 \cdot \frac{1}{(x_2 - x_1)} + y_2 \cdot \frac{1}{(x_2 - x_1)}, \quad (5)$$

$$b = y_1 \cdot \left[ 1 + \frac{x_1}{(x_2 - x_1)} \right] - y_2 \cdot \frac{x_1}{(x_2 - x_1)}. \quad (6)$$

Учитывая, что для диапазона  $x_{b \min} \dots x_{nom}$   $y_1 = 0$ , а  $y_2 = 1$ , уравнения (5), (6) преобразуются в

$$a_1 = \frac{1}{(x_{nom} - x_{b \min})}, \quad (7)$$

$$b_1 = -\frac{x_{b \min}}{(x_{nom} - x_{b \min})}. \quad (8)$$

Первая производная любой передаточной функции является коэффициентом усиления. Для линейной функции из (4) первая производная (7) равна коэффициенту  $a_1$  при  $x$ , т.е. постоянной величине. Величина этого коэффициента одинакова для всего окна, но для второго отрезка симметричной треугольной функции коэффициент имеет отрицательный знак.

Следовательно, погрешность квантования АЦП увеличивается на передаточной функции соответствия норме в  $a_1$  раза. Коэффициенты усиления треугольных функций зависят от ширины окна.

В табл. 1 приведены коэффициенты усиления  $K_G$  треугольных функций соответствия норме в зависимости от ширины окна  $R_W$ , которое приведено в долях единицы.

Таблица 1

$R_W$	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	$\pm 0,05$	$\pm 0,01$
$K_G$	5	10	20	100

На рис. 3 показано, как погрешность, равная единице младшего разряда цифрового кода АЦП, проецируется через передаточную характеристику АЦП на ось  $x$  контролируемой величины, а затем эта же погрешность усиливается на передаточной функции соответствия норме цифрового блока и, уже увеличенная, поступает на цифровой выход устройства контроля. На оси ординат показаны цифровые выходные коды АЦП и устройства контроля, нормированные к единице.

Из табл. 1 видно, что чем уже окно, тем больше коэффициент усиления функции соответствия норме и тем больше влияние погрешности АЦП на выходную погрешность устройства контроля. Назовем эту погрешность погрешностью аппроксимации функции соответствия норме или, сокращенно, «погрешностью аппроксимации».

### Параболическая функция соответствия норме

Простейшей нелинейной функцией является многочлен второй степени вида  $y_{cp} = ax^2 + bx + c$ , который представляет собой параболу с осью, параллельной оси ординат. На рис. 4 изображен график параболы, построенный по известным формулам для нахождения коэффициентов многочлена второй степени по трем известным точкам  $x_{bmin}, y_{bmin}; x_{nom}, y_{nom}; x_{bmax}, y_{bmax}$ .

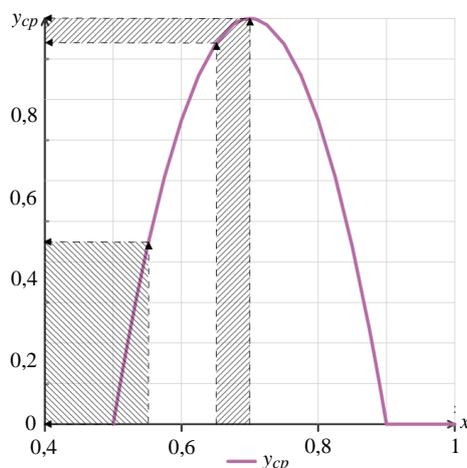


Рис. 4

Аналитически параболическая функция соответствия норме представлена системой уравнений

$$y_{cp}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x = x_{nom}, \\ ax^2 + bx + c, & \text{если } x_{bmin} \leq x \leq x_{bmax}, \\ 0, & \text{если } x_{bmin} > x > x_{bmax}. \end{cases} \quad (9)$$

Коэффициенты  $a, b, c$  рассчитаны таким образом, что значения  $y_{cp}$  в крайних точках окна равны нулю, а в точке  $x = x_{nom}$  значение  $y_{cp}$  равно единице.

Первая производная параболической функции  $y_{cp}$  равна

$$(y_{cp})' = (ax^2 + bx + c)' = 2ax + b = K_x. \quad (10)$$

Из формулы (10) и графика (рис. 4) следует, что коэффициент усиления параболы  $K_x$  зависит от  $x$ , на краях окна имеет максимальное значение, вдвое больше значения  $K_G$  кусочно-линейной треугольной функции. В точке  $x = x_{nom}$  коэффициент усиления  $K_x$  равен нулю.

Как видно, интегральный коэффициент преобразования  $K_G$  передаточной функции линейного АЦП равен единице. Для того чтобы погрешность аппроксимации по отношению к погрешности квантования АЦП на выходе устройства контроля не увеличивалась, достаточно того, чтобы коэффициент усиления функции соответствия норме в требуемой точке был меньше единицы либо равен ей. Для параболической функции соответствия норме это условие выполняется только в области  $x$ , близкой к  $x_{nom}$ .

На рис. 4 показано, что погрешности квантования по уровню АЦП на краях окна контроля увеличиваются и не позволяют точно определить выход измеренного контролируемого параметра за границы допустимых отклонений в точках  $x_{bmin}$ ,  $x_{bmax}$ . Равенство контролируемого параметра его номинальному значению  $x_{nom}$  определяется достаточно точно, так как влияние погрешности квантования аналого-цифрового преобразователя на результаты контроля на этом участке функции соответствия норме ослабляется.

#### Степенные параболические функции соответствия норме

В [8] в качестве функций соответствия норме предложено использовать степенную функцию от параболы. Графики степенных параболических функций с показателями степени  $m = 2$  приведены на рис. 5, а с показателями степеней  $m = 1, 2, 4$  — на рис. 6.

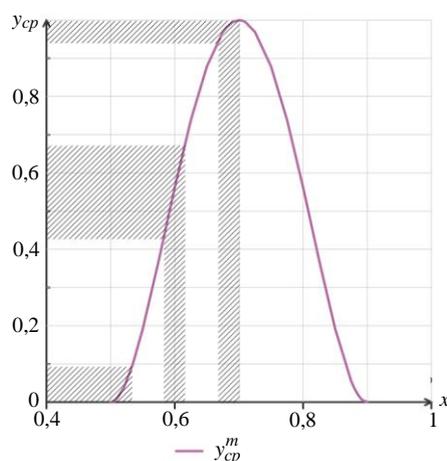


Рис. 5

Аналитически такая функция представлена системой равенств

$$y_{cp}^m(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x = x_{nom}, \\ (ax^2 + bx + c)^m, & \text{если } x_{bmin} \leq x \leq x_{bmax}, \\ 0, & \text{если } x_{bmin} > x > x_{bmax}. \end{cases} \quad (11)$$

Здесь  $m$  — постоянный коэффициент,  $m \in 2, 3, \dots, m$ .

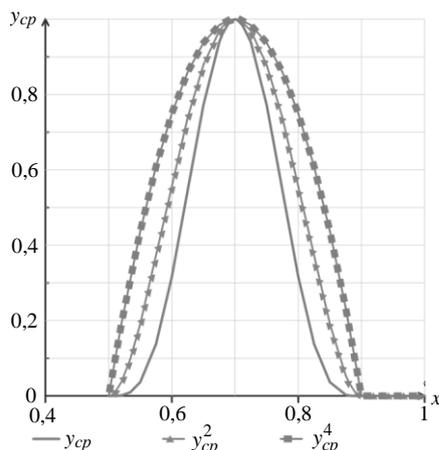


Рис. 6

Первая производная от степенной параболической функции по  $x$  равна

$$(y_{cp}^m(x))' = ((ax^2 + bx + c)^m)' = m \cdot (ax^2 + bx + c)^{m-1} \cdot (2ax + b) = K_x. \quad (12)$$

Второй сомножитель равен нулю на краях окна, а третий — в точке  $x = x_{nom}$ . Это значит, что коэффициенты усиления  $K_x$  в этих точках равны нулю.

Значения  $x_1$ , для которых  $K_x = 1$  для края окна, и  $x_2$ , для которых  $K_x = 1$  для середины окна, определены в среде Excel для разных величин окна для функций  $y_{cp}$ ,  $y_{cp}^2$ ,  $y_{cp}^3$ ,  $y_{cp}^4$ . Размеры участков передаточных функций соответствия норме от  $x_{bmin}$  до  $x_1$  и от  $x_2$  до  $x_{nom}$ , где коэффициент усиления  $K_x$  меньше единицы или равен ей, приведены в табл. 2. На этих участках влияние погрешности АЦП на погрешности выходной величины устройства контроля не увеличивается. Поэтому погрешность аппроксимации функции соответствия норме меньше погрешности АЦП. На участках, где коэффициенты усиления велики, определяющей погрешностью контроля становится погрешность аппроксимации функции соответствия норме. Эти случаи преобразования погрешностей квантования в погрешности результатов контроля показаны на рис. 5.

В табл. 2 приведены результаты расчетов размеров участков степенных параболических функций на краях и в центре окна контроля, на которых  $K_x \leq 1$ . Диапазон измерений нормирован и равен единице. Величина окна приведена в долях единицы.

Таблица 2

Величина окна ( $R_W$ )	Параметры	Расстояния $x_1 - x_{bmin}$ и $x_{nom} - x_2$			
		для $K_x \leq 1$ и $K_{max}$ для разных $y_{cp}$			
		$y_{cp}$	$y_{cp}^2$	$y_{cp}^3$	$y_{cp}^4$
$\pm 0,2$	$x_1 - x_{bmin}$	—	0,005	0,02	0,034
	$x_{nom} - x_2$	0,02	0,011	0,007	0,005
	$K_{max}$	10	7,5	8,43	9,5
$\pm 0,1$	$x_1 - x_{bmin}$	—	0,00128	0,0095	0,013
	$x_{nom} - x_2$	0,005	0,0025	0,0017	0,00126

	$K_{\max}$	20	15	16,9	16,9
	$x_1 - x_{b\min}$	—	0,0003	0,0024	0,005
$\pm 0,05$	$x_{\text{nom}} - x_2$	0,00125	0,00063	0,00042	0,000315
	$K_{\max}$	40	31	34	38
	$x_1 - x_{b\min}$	—	1E-05	0,00021	0,00057
$\pm 0,01$	$x_{\text{nom}} - x_2$	5E-05	3E-05	2E-05	1E-05
	$K_{\max}$	200	150	169	169

Чем больше по величине участки  $(x_1 - x_{b\min})$ ,  $(x_{\text{nom}} - x_2)$ , у которых  $K_x \leq 1$ , тем меньше на них влияет погрешность аппроксимации функции соответствия норме и тем точнее определяется соответствие контролируемого параметра норме.

### Выбор разрешающей способности АЦП и типа функции соответствия норме

В табл. 3 приведены сравнительные данные о погрешностях квантования аналого-цифрового преобразователя, выраженных в различных единицах [3]. Погрешность можно оценить в количестве двоичных разрядов выходного кода  $N_m$ , количестве квантов во всем диапазоне преобразования  $2^N$ , процентах от диапазона преобразования % PS, долях единицы  $1/2^N$ . В табл. 4 представлен результат выполнения оценки погрешности квантования в количестве двоичных разрядов  $N_m$  с использованием данных из табл. 3 и 2.

Таблица 3

Данные из первого столбца табл. 3 подставлены в столбцы 3–6 табл. 4 для степенных параболических функций с разными степенями. Они соответствуют данным областей  $x_1 - x_{b\min}$ ,  $x_{\text{nom}} - x_2$  из табл. 2 и четвертого столбца табл. 3. Фактически в табл. 4 приведены требования к разрешающей способности АЦП, при использовании которого погрешности аппроксимации на краях и в середине окна не увеличиваются.

Для окна  $\pm 0,2$  (табл. 4) первая строка относится к краю окна. Обычная парабола  $y_{cp}$  с  $m = 1$  на краях окна не имеет области, в которой  $K_x \leq 1$ . Поэтому в первой строке для каждого размера окна прочерк.

У функции  $y_{cp}^2$  величина области соответствует разрешающей способности  $N_2 = 8$ . Это значит, что при использовании восьмиразрядного АЦП границу можно определить с разрешающей способностью в восемь двоичных разрядов. При использовании АЦП с большим количеством разрядов граница определяется разрядностью АЦП. Если разрядность АЦП меньше восьми, то возрастает погрешность определения границы за счет погрешности

$N$	$2^N$	% PS	$1/(2^N)$
2	4	25	0,25
3	8	12,5	0,125
4	16	6,25	0,0625
5	32	3,125	0,03125
6	64	1,5625	0,015625
7	128	0,78125	0,007813
8	256	0,390625	0,003906
9	512	0,195313	0,001953
10	1024	0,097656	0,000977
11	2048	0,048828	0,000488
12	4096	0,024414	0,000244
13	8192	0,012207	0,000122
14	16384	0,006104	6,1E-05
15	32768	0,003052	3,05E-05
16	65536	0,001526	1,53E-05

квантования АЦП. У функции  $y_{cp}^3$  величина области на краях окна контроля соответствует  $N_3 = 6$ , а у функции  $y_{cp}^4$  —  $N_4 = 5$ . Это значит, что с увеличением  $m$  величина области на краях окна, где  $K_G \leq 1$ , увеличивается, что видно также из рис. 6.

Вторая строка (табл. 4) для окна  $\pm 0,2$  относится к области, которая расположена вблизи  $x_{nom}$  и у которой  $K_x \leq 1$ . С увеличением  $m$  необходимая разрешающая способность АЦП увеличивается с 6 до 8 бит.

Таблица 4

Ширина окна ( $K_G$ )	Параметры	$N_m$ , для которых погрешности контроля не увеличиваются			
		$y_{cp}$	$y_{cp}^2$	$y_{cp}^3$	$y_{cp}^4$
	$x_1 - x_{bmin}$	—	$\geq 8$ bit	$\geq 6$ bit	$\geq 5$ bit
$\pm 0,2$	$x_{nom} - x_2$	$\geq 6$ bit	$\geq 7$ bit	$\geq 8$ bit	$\geq 8$ bit
	$K_{max}$	10	7,5	8,43	9,5
	$x_1 - x_{bmin}$	—	$\geq 10$ bit	$\geq 8$ bit	$\geq 7$ bit
$\pm 0,1$	$x_{nom} - x_2$	$\geq 8$ bit	$\geq 9$ bit	$\geq 10$ bit	$\geq 10$ bit
	$K_{max}$	20	15	16,9	16,9
	$x_1 - x_{bmin}$	—	$\geq 12$ bit	$\geq 9$ bit	$\geq 8$ bit
$\pm 0,05$	$x_{nom} - x_2$	$\geq 10$ bit	$\geq 11$ bit	$\geq 12$ bit	$\geq 12$ bit
	$K_{max}$	40	31	34	38
	$x_1 - x_{bmin}$	—	$\geq 16$ bit	$\geq 12$ bit	$\geq 11$ bit
$\pm 0,01$	$x_{nom} - x_2$	$\geq 15$ bit	$\geq 15$ bit	$\geq 16$ bit	$\geq 16$ bit
	$K_{max}$	200	150	169	169

В третьей строке табл. 4 приведен максимальный для данной функции коэффициент усиления  $K_{max}$ . Максимальный для всех функций коэффициент имеет функция  $y_{cp}$  на краях окна. У функции  $y_{cp}^2$  коэффициент усиления  $K_{max}$  минимальный среди других степенных функций. По мере увеличения  $m$  коэффициент усиления возрастает. Участки функций с большими коэффициентами усиления  $K_{max}$  расположены между значениями  $x_1$  и  $x_2$  и усиливают погрешности квантования АЦП.

Подобные закономерности существуют для функций в других окнах, однако в них участки функций с  $K_x \leq 1$  значительно уже, и поэтому повышаются требования к разрешающей способности используемого АЦП.

Коэффициенты параболических степенных функций соответствия норме определяются по трем точкам: две — по краям окна контроля, у которых  $y_b = 0$ , и одна — с номинальным значением  $x_{nom}$ , у которой  $y_{nom} = 1$ .

Контролировать можно либо значение  $x_{nom}$ , либо значения  $x_{bmin}$  и  $x_{bmax}$ , либо три перечисленные величины вместе.

Наименьшие погрешности при контроле величины  $x_{nom}$  будут при использовании обычной параболической функции с  $m = 1$ .

Если контролируется выход величины за пределы допустимых отклонений  $x_{b\min}$  и  $x_{b\max}$ , то наименьшей погрешностью аппроксимации обладают функции с большим коэффициентом  $m$ .

Если предполагается возможность одновременного контроля величин  $x_{nom}$ ,  $x_{b\min}$  и  $x_{b\max}$ , то следует выбирать функцию соответствия норме с  $m = 2$ , так как у этой функции погрешности аппроксимации граничных и номинального значений наиболее близки.

### Заключение

1. Проведен анализ передаточных функций измерения и контроля. Показано, что они формируются с помощью ступенчатых функций. Достоверность измерений можно оценивать их погрешностью, а достоверность контроля — вероятностью правильного срабатывания устройства контроля.

2. В качестве передаточной функции контроля предложена не ступенчатая функция, а другие функции соответствия норме, например кусочно-линейная или функции более высоких порядков. При этом результат контроля оценивается не по критерию вероятности верного срабатывания, а с помощью погрешности контроля.

3. С точки зрения преобразования погрешностей проанализированы кусочно-линейная, параболическая и степенные параболические функции соответствия норме для разных величин окон контроля.

4. Даны рекомендации для выбора функций соответствия норме и разрешающей способности аналого-цифрового преобразователя для различных задач контроля.

*В.О. Багацький, О.В. Багацький*

## ПЕРЕТВОРЕННЯ ПОХИБОК НА ПЕРЕДАВАЛЬНИХ ФУНКЦІЯХ ВИМІРЮВАННЯ І КОНТРОЛЮ

В даний час вимірювання електричних і неелектричних величин виконується за допомогою каналів аналого-цифрового перетворення, які складаються зі схем аналогового кондиціонування сигналів і аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) електричних величин в цифровий код. Розглянуто випадок, коли визначальними похибками каналу вимірювання і контролю є систематичні похибки АЦП. Достовірність вимірювань оцінюється їх похибками, а достовірність контролю — ймовірністю вірного спрацювання пристрою контролю. На думку авторів, оцінювання достовірності таких схожих процесів, як вимірювання і контроль, за допомогою різних критеріїв є нелогічним. Метою роботи є дослідження впливу систематичних похибок аналого-цифрового перетворювача на похибки контролю параметрів в залежності від виду функцій відповідності нормі і ширини вікна контролю, а також вибір роздільної здатності АЦП для різних завдань контролю. Виконано аналіз передавальних функцій вимірювання та контролю. Показано, що вони формуються за допомогою ступінчастих функцій. Запропоновано в якості передавальної функції контролю використовувати не ступінчасту функцію, а інші функції відповідності нормі, наприклад лінійну або функції більш високих порядків. При цьому результат контролю оцінюється не за критерієм ймовірності вірного спрацювання, а за допомогою похибки контролю. Проаналізовано з точки зору перетворення похибок лінійну, параболическу і степеневі параболическі функції відповідності нормі для різних розмірів вікон контролю. Надано рекомендації щодо вибору функцій відповідності нормі і роздільної здатності аналого-цифрового перетворювача для різних завдань контролю.

**Ключові слова:** похибки засобів вимірювання та контролю, передавальні функції, перетворення похибок.

## ERRORS CONVERSION ON TRANSFER FUNCTIONS OF MEASUREMENT AND CONTROL

Currently, the measurement of electrical and non-electrical quantities is performed using analog-to-digital conversion channels, which consist of analog signal conditioning circuits and analog-to-digital converters (ADC) of electrical quantities into a digital code. The paper considers the case when the defining errors of the measurement and control channel are systematic errors of the ADC. The reliability of measurements is assessed by their errors, and the reliability of control - by the likelihood of correct operation of the control device. In our opinion, evaluating the reliability of such similar processes as measurement and control using different criteria seems illogical. The aim of the work is to study the effect of systematic errors of an analog-to-digital converter on the errors of parameter control depending on the type of conformity functions and the width of the control window, as well as the choice of the resolution of the ADC for various control tasks. The paper analyzes the transfer functions of measurement and control. It is shown that they are formed using step functions. It is proposed to use not a step function as a control transfer function, but other functions of conformity to the norm, for example, a linear function or functions of higher orders. In this case, the control result is assessed not according to the criterion of the probability of correct operation, but using the control error. Analyzed from the point of view of reconfiguring the errors of the line, parabolic and state parabolic functions of the norms for the development of changes windows in control. A recommendation has been given for the selection of functions for the conformity of standards and for the distribution of analog-to-digital conversions for industrial control enterprises.

**Keywords:** errors of measurement and control devices, transfer function, errors conversions.

1. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы. М. : Энергоатомиздат, 1985. 439 с.
2. ДСТУ-3744 – 98. Перетворювачі вимірювальні напруги і струму цифрові. Загальні технічні умови. Держстандарт України, 1998. 16 с.
3. Kester W. Data conversion handbook. Analog devices, 2005. 953 p.
4. Преобразователи формы информации для малых ЭВМ. А.И. Кондалев, В.А. Багацкий, В.А. Романов, В.А. Фабричев. Киев : Наук. думка, 1982. 312 с.
5. Быстродействующие интегральные микросхемы ЦАП и АЦП и измерение их параметров. А.-Й. К. Марцинкявичус, Э.-А. К. Багданскис, Р.Л. Пошюнас и др. М. : Радио и связь, 1988. 224 с.
6. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. К. : Вища шк., 1976. 432 с.
7. Марпл мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М. : Мир, 1990. 584 с.
8. Багацкий В.А., Багацкий А.В. Степень соответствия технологического процесса норме как показатель функциональной безопасности. *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики»*. 2019. № 5. С. 106–113.

*Получено 21.12.2020*