

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ КОРРЕКЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ  
АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПО РАЗРАБОТАННОМУ МЕТОДУQUANTITATIVE ESTIMATION OF RESULTS THE CORRECTION OF ERRORS  
OF ANALOG-DIGITAL CONVERTERS ON THE DEVELOPED METHOD

**Аннотация.** В статье предложен способ усовершенствования итерационного метода касательных (Ньютона), предназначенного для коррекции погрешностей аналого-цифровых преобразователей, и приведена количественная оценка результатов коррекции по разработанному методу.

**Annotation.** In article is offered the way of improvement of an iterative method of Newton, intended for correction of errors of analog-digital converters, and is given the quantitative estimation of results of correction on the developed method.

**Ключевые слова.** Аналого-цифровые преобразователи (АЦП), точность, коррекция погрешностей, метод касательных (Ньютона).

**Key words.** Analog-digital converters (ADC), accuracy, correction of errors, method of Newton.

В настоящее время широкое распространение получили три основных способа повышения точности аналого-цифровых преобразователей (АЦП) цифровых измерительных устройств:

- технологический, заключающийся в разработке и совершенствовании существующих элементов и узлов измерительного устройства;
- конструктивный, основанный на оптимизации построения схем узлов измерительного устройства;
- и наиболее перспективный – структурный, направленный на то, чтобы за счет соответствующего построения измерительного процесса уменьшить результирующую погрешность до уровня, определяемого точностью образцовой меры.

Структурный подход способствует линеаризации функции преобразования АЦП, искаженной погрешностями, за счет коррекции возникающих в процессе преобразования погрешностей.

Однако недостатками операции коррекции погрешностей АЦП (в частности наиболее эффективного итерационного метода касательных) являются сложность и низкая скорость сходимости в следствии неоптимального способа определения производной функции преобразования АЦП. Это связано с тем, что при вычислении шага  $\gamma(i) = 1 / F'[\varphi(y_i)]$  алгоритма  $y_{i+1} = y_i - \gamma(i) \cdot (F[\varphi(y_i)] - F(\bar{x}))$  приходится ограни-

чиваться той или иной аппроксимацией производной функции преобразования АЦП  $F'[\varphi(y_i)]$ , так как из-за искажения погрешностями, реальная функция преобразования АЦП неизвестна, где  $i = 1, 2, \dots$  – итерация циклов коррекции;  $y$  – цифровой код;  $\bar{x}$  – измеряемая неизвестная величина;  $F, \varphi$  – функции преобразования АЦП и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) [1, 2].

Поэтому совершенствование операции коррекции погрешностей АЦП выделяется в самостоятельную задачу и требует разработки новых более эффективных методов.

В рамках данной задачи нами выполнено усовершенствование итерационного метода касательных на основе линеаризации и использования известного из математики метода Ньютона [3].

Математический аппарат усовершенствованного метода выглядит следующим образом:

$$y = f(x_{(i-1)}) + f'(x_{(i-1)}) \cdot (x_{i,ck} - x_{(i-1)}); \quad (1)$$

$$x_{i,ck} = x_{(i-1)} + \frac{y - f(x_{(i-1)})}{f'(x_{(i-1)})}; \quad (2)$$

$$f'(x_{(i-1)}) = \frac{f(x_{(i-1)} + \Delta x) - f(x_{(i-1)})}{\Delta x} = \frac{y'_i - y_i}{K}; \quad (3)$$

$$x_{i,ck} = x_{(i-1)ck} + \frac{y - y_i}{y_i - y_i} \cdot K \quad \text{или} \quad x_{i,ck} = x_{(i-1)ck} + \Delta_i, \quad (4)$$

где  $x_{(i-1)}, f(x_{(i-1)}) = y_i$  – координаты точки касания касательной к кривой  $y=F(x)$ , являющейся функцией преоб-

разования реального АЦП;

$x_{i,ck} = y_{i,ck}$  – скорректированный код входного сигнала в  $i$ -й цикл коррекции;

$\bar{y}$  – результат цифрового измерения входного сигнала  $\bar{x}$ ;

$y, y_i'$  – результаты аналого-цифрового преобразования первого  $U_{y1}^i$  и второго  $U_{y2}^i$  эталонных сигналов, формируемых ЦАП;

$K$  – код аддитивной добавки;

$\Delta_i$  –  $i$ -я коррекция, приближающая решение к истинному значению  $\bar{x}$ .

Это позволяет более оптимально определять производную функции преобразования АЦП (а значит, и шаг алгоритма) и упростить выражение (4) для определения скорректированного результата, по сравнению с известными, более сложными итерационными методами [4, 5], где

$$x_{i,ck} = \frac{K}{y_i' - y_i} \cdot (\bar{y} - y_i + \frac{y_i - y_i'}{K} \cdot \bar{y}); \quad (5)$$

$$\text{или } x_{ck} = y_1 \cdot \left( \frac{2K}{y_3 - y_2} + 1 \right) - \frac{y_3 + y_2}{y_3 - y_2} \cdot K. \quad (6)$$

Поэтому достигаемым результатом является исключение присущей методу касательных методической погрешности и увеличение его скорости сходимости.

Для получения количественной оценки результатов коррекции погрешностей АЦП по усовершенствованному методу касательных было проведено моделирование с использованием среды программирования Matchcad.

Анализу подверглось семейство аддитивно-мультипликативных функций преобразования АЦП, определяемых значениями коэффициентов «а», «b», «с», рис. 1, а именно:

$$F_1(x) = 0,7 \cdot x - 0,23 \cdot x^2; \quad F_6(x) = 0,1 + 0,7 \cdot x - 0,23 \cdot x^2;$$

$$F_2(x) = 1 \cdot x - 0,23 \cdot x^2; \quad F_7(x) = 0,1 + 1 \cdot x - 0,23 \cdot x^2;$$

$$F_3(x) = 1,1 \cdot x - 0,23 \cdot x^2; \quad F_8(x) = 0,1 + 1,1 \cdot x - 0,23 \cdot x^2;$$

$$F_4(x) = 0,7 \cdot x + 0,05 \cdot x^2; \quad F_9(x) = 0,1 + 0,7 \cdot x + 0,05 \cdot x^2;$$

$$F_5(x) = 0,7 \cdot x + 0,1 \cdot x^2; \quad F_{10}(x) = 0,1 + 0,7 \cdot x + 0,1 \cdot x^2;$$

В ходе моделирования была проведена оценка влияния значений коэффициентов «K», «a», «b» и «c» функции преобразования АЦП  $F(x) = b + a \cdot x + c \cdot x^2$  на результаты коррекции, при различной разрядности АЦП,  $m \in \{8; 12\}$ . Оценки параметров преобразования входного сигнала в ходе коррекции с учетом полос аддитивно-смещенных функций и количества итераций приведены в табл.1.

Оценка проводилась как для случая малого уровня входного сигнала ( $x=0,2$ ), среднего уровня входного сигнала ( $x=0,5$ ), высокого уровня входного сигнала ( $x=0,8$ ) (табл.1), так и для случая изменения уровня входного сигнала в диапазоне  $x \in [0; 1]$  (рис. 1).

Коэффициент «b» изменялся в диапазоне:  $[0; 0,1]$ , коэффициенты «a» и «c» принимали значения из множеств:  $a \in [0,7; 1; 1,1], b \in [-0,23; 0,05; 0,1]$ .

Оценка результатов коррекции проводилась с использованием выражений (7)–(9).

$$M = \sum_{j=1}^L x_{j,i,ck} / L, \quad (7)$$

Таблица 1

**Оценка параметров преобразования входного сигнала в ходе коррекции**

Уровень входного сигнала	Функция преобразования	Число разрядов АЦП	F <sub>1</sub> (x)	F <sub>2</sub> (x)	F <sub>3</sub> (x)	F <sub>4</sub> (x)	F <sub>5</sub> (x)
			÷ F <sub>6</sub> (x)	÷ F <sub>7</sub> (x)	÷ F <sub>8</sub> (x)	÷ F <sub>9</sub> (x)	÷ F <sub>10</sub> (x)
низкий $\bar{x} = 0,2$	$\delta_i$	8	0,332	0,332	0,322	0,332	0,558
		12	0,456	0,333	0,333	0,481	0,429
	число итераций	8	3				
		12	2				
средний $\bar{x} = 0,5$	$\delta_i$	8	0,963	0,834	0,827	0,827	0,827
		12	0,955	0,854	0,833	0,833	0,833
	число итераций	8	2				
		12	3				
высокий $\bar{x} = 0,8$	$\delta_i$	8	1,551	1,399	1,42	1,385	1,329
		12	1,412	1,404	1,372	1,333	1,333
	число итераций	8	3				
		12	3				

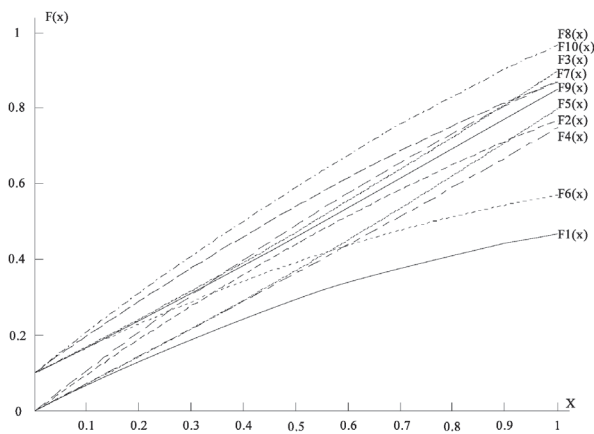


Рис.1. Функции преобразования АЦП вида  $F(x) = b + a \cdot x + c \cdot x^2$

где  $M$  – математическое ожидание значения скорректированного результата;

$j$  – номер выборки (в диапазоне изменения коэффициентов «а», «b», «с») в ходе коррекции;

$L$  – число выборок;

$x_{i,ck}$  – скорректированное значение входного сигнала после  $i$ -й итерации;

$x_{j,i,ck}$  – скорректированное значение входного сигнала в  $j$ -й выборке.

$$D = \sum_{j=1}^L (x_{j,i,ck} - M)^2 / (L - 1), \tag{8}$$

где  $D$  – дисперсия отклонения скорректированного значения  $x_{i,ck}$  выражения (4) входного сигнала от его математического ожидания.

$$\delta_n = \sqrt{D} / \Delta, \tag{9}$$

где  $\delta_n$  – нормированное значение среднего квадратического отклонения скорректированного значения входного сигнала от его математического ожидания;

$\Delta$  – шаг квантования АЦП, определяется выражением

$$\Delta = \frac{1}{2^m - 1}, \tag{10}$$

где  $m$  – число разрядов выходной кодограммы АЦП.

Для наглядности оценки среднее квадратическое отклонение скорректированного значения входного сигнала от его математического ожидания приведено к величине шага квантования (младшего разряда выходного кода АЦП), согласно (9).

Также оценивались погрешности полной шкалы  $\delta_{FS}$ , смещения нуля  $\delta_{OS}$  и нелинейности  $\delta_N$ , до коррекции и после коррекции по усовершенствованному методу касательных для случаев 8- и 12-разрядных АЦП.

В табл. 2 приведены результаты оценки для всех функций преобразования АЦП.

Таблица 2

**Сравнительная оценка погрешностей функций преобразования АЦП до и после коррекции**

Функция преобразования АЦП	Число разрядов АЦП	Погрешность (до коррекции/после коррекции)					
		полной шкалы $\delta_{FS}$ [мзр*], (%)		смещения нуля $\delta_{OS}$ [мзр], (%)		нелинейности $\delta_N$ [мзр], (%)	
$F_1(x)$	8	136	53,333	0	0	136	53,333
		3	1,176	0	0	3	1,176
	12	2171	53,016	0	0	2171	53,016
		2	0,049	0	0	3	0,073
$F_2(x)$	8	59	23,137	0	0	59	23,137
		-1	-0,392	0	0	1	0,392
	12	942	23,004	0	0	942	23,004
		0	0	0	0	2	0,049
$F_3(x)$	8	34	13,333	0	0	34	13,333
		1	0,392	0	0	1	0,392
	12	533	13,016	0	0	533	13,016
		1	0,024	0	0	2	0,049
$F_4(x)$	8	64	25,098	0	0	64	25,098
		0	0	0	0	1	0,392
	12	1024	25,006	0	0	1024	25,006
		0	0	0	0	1	0,024
$F_5(x)$	8	51	20	0	0	51	20
		-1	-0,392	0	0	1	0,392
	12	819	20	0	0	819	20
		0	0	0	0	1	0,024

Продолжение таблицы 2

Функция преобразования АЦП	Число разрядов АЦП	Погрешность (до коррекции/после коррекции)					
		полной шкалы $\delta_{FS}$		смещения нуля $\delta_{OS}$		нелинейности $\delta_N$	
		[мзр*], (%)		[мзр], (%)		[мзр], (%)	
$F_6(x)$	8	110	43,137	25	9,804	110	43,137
		1	0,392	0	0	3	1,176
	12	1761	43,004	409	9,988	1761	43,004
		0	0	0	0	4	0,098
$F_7(x)$	8	34	13,333	25	9,804	34	13,333
		0	0	0	0	2	0,784
	12	533	13,016	409	9,988	533	13,016
		0	0	0	0	2	0,049
$F_8(x)$	8	8	3,137	25	9,804	28	10,98
		0	0	0	0	1	0,392
	12	123	3,004	409	9,988	454	11,087
		0	0	0	0	1	0,024
$F_9(x)$	8	39	15,294	25	9,804	39	15,294
		0	0	0	0	1	0,392
	12	615	15,018	409	9,988	615	15,018
		0	0	0	0	2	0,049
$F_{10}(x)$	8	26	10,196	25	9,804	26	10,196
		1	0,392	0	0	1	0,392
	12	410	10,012	409	9,988	410	10,012
		0	0	0	0	2	0,049

\*мзр – младший значащий разряд АЦП

В табл. 3 и на рис. 2 приведены результаты оценки для наихудшего случая – функции преобразования АЦП  $F_6(x)$  и усредненной функции преобразования АЦП  $F_{cp}(x)$ .

Они свидетельствуют о возможности существенного снижения погрешностей полной шкалы и нелинейности, равных в наихудшем случае 43,13% (или 110 младших значащих разрядов) до одного и трех младших значащих разрядов соответственно; и полного устранения

погрешности смещения нуля.

Сравнительная оценка исправляющей способности усовершенствованного метода коррекции, с погрешностями современных интегральных микросхем (ИМС) АЦП представлена в табл. 4.

Таким образом, проведенные исследования показали, что результаты коррекции погрешностей по усовершенствованному методу касательных сопоставимы с основными погрешностями современных АЦП, приводи-

Таблица 3

**Сравнительная оценка погрешностей функций преобразования АЦП до и после коррекции по разработанному методу**

Функция преобразования АЦП	Число разрядов АЦП	Ед. изм.	Погрешность (до коррекции и после коррекции)					
			полной шкалы $\delta_{FS}$		смещения нуля $\delta_{OS}$		нелинейности $\delta_N$	
			до	после	до	после	до	после
$F_6(x)$ Наихудшая	8	мзр	<b>110</b>	1	<b>25</b>	0	<b>110</b>	3
		%	<b>43,13</b>	0,39	<b>9,80</b>	0	<b>43,13</b>	1,17
	12	мзр	<b>1761</b>	0	<b>409</b>	4	<b>1761</b>	4
		%	<b>43</b>	0	<b>9,98</b>	0,098	<b>43</b>	0,098
$F_{cp}(x)$ Усредненная	8	мзр	<b>56,1</b>	0,3	<b>12,5</b>	0	<b>56,1</b>	0,6
		%	<b>22</b>	0,118	<b>4,90</b>	0	<b>22</b>	0,235
	12	мзр	<b>893,1</b>	0,3	<b>204,5</b>	0	<b>893,1</b>	0,8
		%	<b>21,81</b>	0,007	<b>4,99</b>	0	<b>21,81</b>	0,02

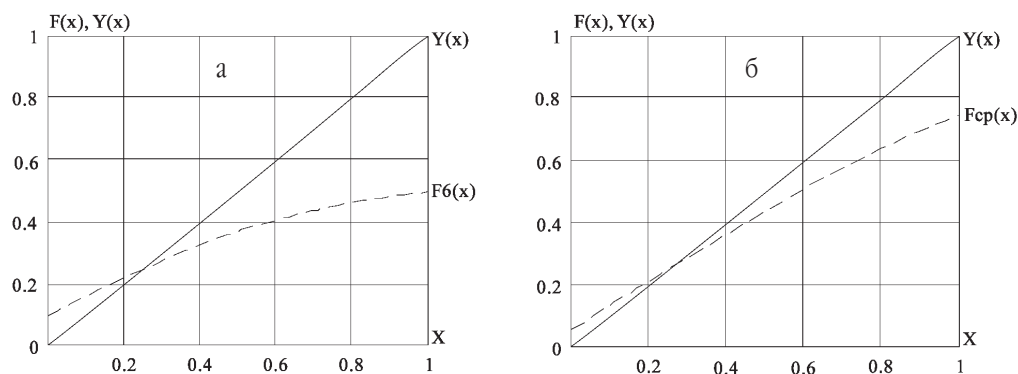


Рис. 2. Характеристики преобразования АЦП: а – до  $F(x)$ ; б – после  $Y(x)$  коррекции;  $m = 8$

Таблица 4

Основные погрешности АЦП

Разрядность $m$		Погрешность полной шкалы $\delta_{FS}$ [мзр]	Погрешность смещения нуля $\delta_{OS}$ [мзр]		Погрешность нелинейности $\delta_N$ [мзр]		
8	ИМС	MAX1121	$\pm 2$		$\pm 10$		
		K572ПВ3	$\pm 3$		$\pm 4$		
	Исправляющая способность	<b>Метод коррекции</b>	Было +56	<b>+0,3</b>	Было +12	<b>0</b>	Было +56
12	ИМС	AD7495	$\pm 2$		$\pm 8$		
		K572ПВ1	$\pm 127$		$\pm 2$		
	Исправляющая способность	<b>Метод коррекции</b>	Было +893	После <b>+0,3</b>	Было +204	После <b>0</b>	Было +893

мыми разработчиками в технической документации для нормальных условий.

**Выводы**

1. С целью повышения быстродействия операции коррекции погрешностей аналого-цифровых преобразователей выполнено усовершенствование итерационного метода касательных на основе линеаризации и использования известного из математики метода Ньютона.

2. Разработан математический аппарат усовершенствованного метода.

3. Выполненная количественная оценка результатов коррекции погрешностей по данному методу показала, что в случае 8-разрядного АЦП при погрешности пол-

ной шкалы (ПШ) до 53 % (136 младших значащих разрядов (мзр), в ходе коррекции обеспечивается ее снижение до 3 мзр (1,176% от ПШ); при погрешности смещения нуля до 9,8% от ПШ (25 мзр) обеспечивается ее полное устранение; при погрешности нелинейности до 6% от ПШ (15 мзр) обеспечивается ее снижение до 3 мзр (1,176% от ПШ). В случае 12-разрядного АЦП степень коррекции выше.

4. Результаты коррекции погрешностей по усовершенствованному методу сопоставимы с основными погрешностями современных аналого-цифровых преобразователей, приводимыми разработчиками в технической документации для нормальных условий.

*Литература*

1. Алиев Т.М. и др. Итерационные методы повышения точности измерений / Т.М.Алиев, А.А.Тер-Хачатуров, А.М.Шекиханов. – М: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.  
 2. Алиев Т.М., Сейдель Л.Р. Автоматическая коррекция погрешностей цифровых измерительных приборов. – М: Энергия, 1975. – 216 с.  
 3. Патент № 2326494, РФ, МПК8 Н03М 1/10. Способ коррекции погрешностей аналого-цифрового преобразования и устройство для его осуществления / Бондарь М.С. – опубл. 10.06.08, Бюлл. № 16.  
 4. Патент №1714808, РФ, МПК8 Н03М 1/10. Способ коррекции погрешностей аналого-цифрового преобразования / Шаронов А.В., Мугаллимова О.М., Шаймарданов Ф.А., Андрианова Л.П. – опубл. 23.02.92, Бюлл. № 7.  
 5. Авторское свидетельство № 984030 СССР, МПКЗ Н03К 13/02. Способ коррекции погрешностей аналого-цифрового преобразования / Изаков Е. Т., Беляевский А. И. – опубл. 23.12.82, Бюллетень. № 47.

Материал поступил в редакцию 30. 07. 2009 г.