

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И БИМЕДИЦИНСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.317.1: 621.3.087.92

УЧЕТ НЕЛИНЕЙНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА ПО СВЯЗАННЫМ ГИСТОГРАММАМ ПРИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ АЦП

А. М. Абрамов, к.т.н., доцент кафедры ИИБМТ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0006-7274-5206, e-mail: abramov.a.job@yandex.ru

Рассматривается задача определения вклада нелинейной составляющей измерительного сигнала (ИС) при метрологических испытаниях в интегральную нелинейность АЦП. Целью работы является определение интегральной и дифференциальной нелинейностей АЦП с помощью нового метода, снижающего требования к эталонным средствам измерений по классу точности за счет учета нелинейной составляющей ИС. Для этого на вход испытываемого АЦП последовательно подают периодический ИС треугольной формы, смещенный по уровню вниз ИС и смещенный по уровню вверх ИС. Строят первую гистограмму распределения кодов АЦП при отсутствии смещения ИС, вторую и третью гистограммы – при смещении ИС вниз и вверх. После этого для каждого кода АЦП во второй и третьей гистограмме с помощью первой гистограммы составляют два уравнения, которые приводят к одному, и решают полученные системы уравнений при смещении ИС вниз и вверх методом наименьших квадратов, определяя смещение ИС и вклад нелинейной составляющей ИС в интегральную нелинейность для каждого кода АЦП. Учитывая нелинейную составляющую ИС, определяют интегральную нелинейность для каждого кода АЦП, а затем по интегральной нелинейности определяют дифференциальную нелинейность АЦП.

Ключевые слова: измерительный сигнал, смещение, нелинейная составляющая, интегральная нелинейность, дифференциальная нелинейность, аналого-цифровой преобразователь, гистограмма, метод наименьших квадратов, функция преобразования.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-88-95-105

Введение

Все средства измерения (СИ), используемые в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерения Российской Федерации (РФ), должны отвечать определенным требованиям и нормам в отношении точности получаемых с их помощью данных. С целью обеспечения необходимой точности измерительной информации и своевременного выявления погрешностей в показаниях СИ подвергаются регулярной поверке в соответствии с Законом РФ «Об обеспечении единства измерений» [1, 2].

Достоверность результатов поверки как процесса контроля погрешности существенно зависит от методики выполнения измерений. Поверка АЦП осуществляется, как правило, традиционным гистограммным методом, который полагается на генерацию линейного измерительного (испытательного) сигнала [3]. Любая нелинейность или искажения в ИС приведут к тому, что изменится ожидаемое количество отсчетов для каждого кодового интервала испытываемого АЦП.

В работах [4, 5] авторы предлагают метод скользящей гистограммы, позволяющий обойти этот недостаток и преодолеть метрологические ограничения средств испытаний и измерений за счет смещения входного сигнала по всему динамическому диапазону АЦП с номи-

нальным шагом, соизмеримым с интервалом квантования АЦП. Такой подход требует больших временных затрат на проведение метрологического испытания, поскольку необходимо получить 2^K (K – разрядность АЦП) локальных гистограмм для построения общей гистограммы. Кроме того, погрешность от нелинейности в предлагаемом методе возникает в случае, когда имеются совместная нелинейность ИС и интегральная нелинейность его перемещения.

Рассматриваемый метод позволяет определять интегральную и дифференциальную нелинейности АЦП, снизив требования к эталонным средствам измерений по классу точности за счет учета нелинейной составляющей ИС. Это достигается за счет двух смещений входного сигнала, что значительно сокращает время проведения метрологического испытания в сравнении с методом скользящей гистограммы.

Теоретическая часть

Суть нового метода заключается в следующем. На вход испытываемого АЦП последовательно подают периодический ИС треугольной формы, смещенный по уровню вниз ИС и смещенный по уровню вверх ИС. Строят первую гистограмму распределения кодов АЦП при отсутствии смещения ИС, вторую и третью гистограммы при смещении ИС вниз и вверх, после чего для каждого кода АЦП во второй и третьей гистограммах с помощью первой гистограммы составляют два уравнения, которые приводят к одному, и решают полученные системы уравнений при смещении ИС вниз и вверх методом наименьших квадратов, определяя смещение ИС и вклад нелинейной составляющей ИС в интегральную нелинейность для каждого кода АЦП. Учитывая нелинейную составляющую ИС, определяют интегральную нелинейность для каждого кода АЦП, а затем по интегральной нелинейности определяют дифференциальную нелинейность АЦП.

Для снятия трех гистограмм выполняют следующую последовательность действий.

1. Выделяют входной диапазон испытываемого АЦП: U_H – нижнее напряжение АЦП, соответствующее минимальному напряжению кодового перехода испытываемого АЦП; U_B – верхнее напряжение АЦП, соответствующее максимальному напряжению кодового перехода испытываемого АЦП.

2. Исходный периодический ИС треугольной формы с входным диапазоном, равным входному диапазону испытываемого АЦП, подают на вход АЦП так, чтобы нижняя граница исходного ИС соответствовала минимальному напряжению кодового перехода АЦП, и по количеству появлений каждого кода АЦП строят первую гистограмму.

3. Исходный ИС суммируют с сигналом перемещения, смещая исходный ИС по уровню вниз на величину, равную одной четверти входного диапазона АЦП, и по количеству появлений каждого кода АЦП строят вторую гистограмму.

4. Исходный ИС суммируют с сигналом перемещения, смещая исходный ИС по уровню вверх на величину, равную одной четверти входного диапазона АЦП, и по количеству появлений каждого кода АЦП строят третью гистограмму. На этом испытания заканчивают.

Покажем, как с помощью трех связанных гистограмм определяют вклад нелинейной составляющей ИС в интегральную нелинейность для каждого кода АЦП. Функцию преобразования (ФП) испытываемого АЦП с максимальным числом кодовых комбинаций $N = 2^K$ в диапазоне от U_H до U_B можно представить следующим образом:

$$D(x) = \begin{cases} 0, & x \leq V_0, \quad U_H = V_0 \\ j, & V_{j-1} < x \leq V_j, \quad j = 1, \dots, N-2, \\ N-1, & V_{N-2} < x, \quad U_B = V_{N-2}, \end{cases}$$

где D – выходной код АЦП, x – входное аналоговое напряжение, V_0 – минимальное напряжение кодового перехода АЦП, V_{N-2} – максимальное напряжение кодового перехода АЦП, V_j – j -е напряжение кодового перехода АЦП.

На рисунке представлена реальная ФП с интегральной нелинейностью для каждого кода АЦП (INL_j), за исключением минимального и максимального.

Идеальный АЦП с номинальной линейной ФП имеет равномерное распределение напряжений кодовых переходов U_j в диапазоне от U_H до U_B с постоянным приращением или шагом, называемым номинальным интервалом квантования $h_H = \frac{V_{N-2} - V_0}{N - 2}$.

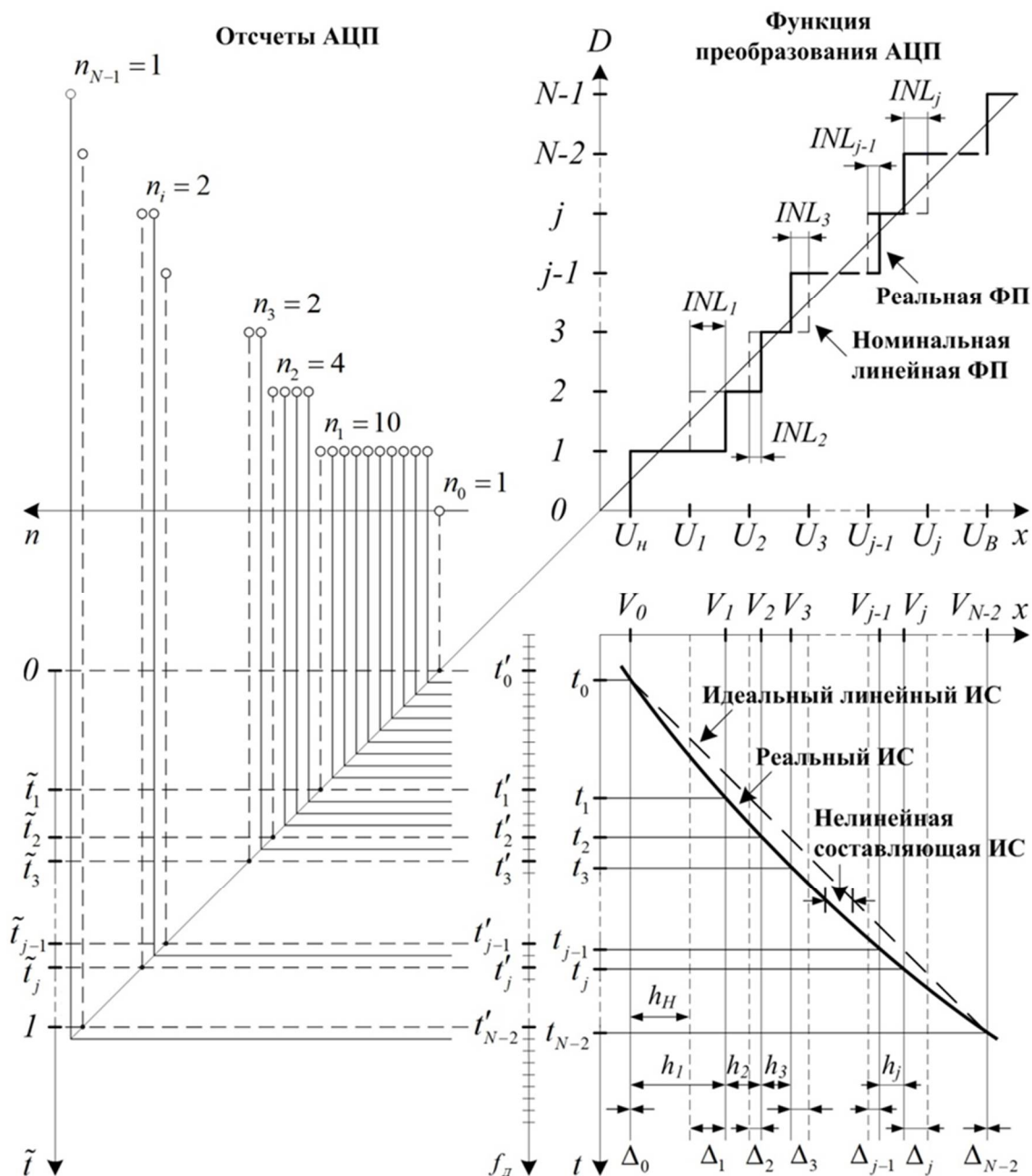


Рисунок 1 – Пример преобразования реального ИС в цифровой код
Figure 1 – Example of converting a real measurement signal into a digital code

Напряжение кодового перехода идеального АЦП равно

$$U_j = V_0 + \frac{V_{N-2} - V_0}{N - 2} j,$$

где $j = 0, 1, \dots, N - 2$ – порядковый номер текущего кода АЦП.

Интегральная нелинейность для j -го кода (или текущего кода) АЦП Δ_j определяется как разность между реальным V_j и идеальным U_j напряжением кодового перехода АЦП $\Delta_j = V_j - U_j$.

Выражая INL_j относительно h_H , получаем:

$$INL_j = \frac{\Delta_j}{h_H} = \frac{V_j - U_j}{h_H} = \frac{(V_j - V_0)(N-2)}{V_{N-2} - V_0} - j, \quad j = 1, \dots, N-3. \quad (1)$$

Дифференциальная нелинейность для j -го кода АЦП (DNL_j) определяется как

$$DNL_j = \frac{h_j - h_H}{h_H}, \quad j = 1, 2, \dots, N-2,$$

где h_j – абсолютное значение j -го интервала квантования.

Также с помощью INL_j можно найти $DNL_j = INL_j - INL_{j-1}$. Интегральная нелинейность АЦП равна $INL = \max_j \{|INL_j|\}$.

Известный гистограммный метод испытания АЦП [6] основан на формировании идеального линейного ИС, в то время как реальный ИС всегда имеет нелинейную составляющую, которая заставляет его отклоняться от прямой линии (см. рисунок 1).

Реальный ИС $x(t)$ можно представить в виде

$$x(t) = x_{cm} + \alpha t + F(t),$$

где x_{cm} – напряжение смещения, αt – линейная составляющая ИС, $F(t)$ – нелинейная составляющая ИС.

При подаче реального ИС $x(t)$ на вход АЦП определить INL_j не удастся, так как любая нелинейность или искажения в ИС изменяют ожидаемое количество появлений кодов АЦП.

Введем понятие времени кодового перехода t_j для j -го кода (или текущего кода) АЦП – это интервал времени, за который реальный ИС $x(t)$ станет равным V_j и выходной код АЦП изменится с j на $j+1$. Условие равенства реального напряжения кодового перехода АЦП с реальным ИС $x(t)$ выглядит следующим образом: $V_j = x(t_j)$, $j = 0, 1, \dots, N-2$.

Пусть время кодового перехода для нижнего напряжения U_H АЦП соответствует нулю ($t_0 = 0$), а для верхнего напряжения U_B АЦП соответствует единице ($t_{N-2} = 1$). Тогда напряжение смещения x_{cm} реального ИС $x(t)$ будет определяться минимальным напряжением кодового перехода АЦП ($x_{cm} = V_0$), а линейная составляющая ИС будет равна $\alpha = V_{N-2} - V_0$. Нелинейная составляющая $F(t)$ ИС при $t_0 = 0$ и $t_{N-2} = 1$ будет равна нулю $F(0) = F(1) = 0$.

Тогда, $x(t)$ будет иметь вид

$$x(t) = V_0 + (V_{N-2} - V_0)t + F(t), \quad 0 \leq t \leq 1. \quad (2)$$

Данное выражение описывает реальный ИС, амплитуда которого равна U_H при $t_0 = 0$ и U_B при $t_{N-2} = 1$, а нелинейность определяется $F(t)$.

Представим $F(t)$ с помощью набора базисных функций $\{F_i(t), i = 1, 2, 3, \dots\}$. В качестве набора базисных функций используем тригонометрические функции на интервале $[-1, 1]$.

Расширим $F(t)$ для охвата интервала $[-1, 1]$.

$$\tilde{F}(t) = \begin{cases} F(t), & 0 \leq t \leq 1 \\ -F(-t), & -1 \leq t < 0 \end{cases}.$$

Представим $\tilde{F}(t)$ в виде тригонометрических функций:

$$\tilde{F}(t) = \sum_{i=1,2,\dots} a_i \sin(i\pi t) + \sum_{i=0,1,\dots} b_i \cos(i\pi t), \quad -1 \leq t \leq 1,$$

где a_i , $i=1,2,\dots$ и b_i , $i=0,1,2,\dots$ – коэффициенты тригонометрических функций.

Поскольку расширенная функция нечетная, то коэффициенты функций косинуса равны нулю. Тогда на интервале $[0, 1]$ $F(t)$ будет иметь вид:

$$F(t) = \sum_{i=1}^S a_i \sin(i\pi t) + \theta(t),$$

где $\theta(t)$ – остаток от нелинейности ИС, возникающий из-за ограниченного набора S базисными функциями.

Предлагаемый набор S может быть выбран таким, чтобы остаток от нелинейности ИС $\theta(t) \rightarrow 0$. Выбор S зависит от скорости изменения нелинейной составляющей ИС. Нелинейность ИС может быть большой, но она не должна меняться слишком быстро для набора $S \leq 10$. В случае высокочастотной нелинейности необходимо увеличить набор базисных функций.

Считается, что функция $F(t)$ определена, если определены коэффициенты a_i , $i=1,2,\dots,S$. Для упрощения вывода в дальнейшем не будем использовать член $\theta(t)$.

Другие варианты набора базисных функций $\{F_i(t), i=1,2,3,\dots\}$ также могут быть использованы для описания $F(t)$. Главное, чтобы все они удовлетворяли следующим условиям:

$$F(t) \cong \sum_{i=1}^S a_i F_i(t), \quad 0 \leq t \leq 1;$$

$$F_i(0) = F_i(1) = 0, \quad i=1,2,\dots,S.$$

С учетом этого выражение (2) описывающее реальный ИС примет вид:

$$x(t) \cong V_0 + (V_{N-2} - V_0)t + \sum_{i=1}^S a_i \sin(i\pi t), \quad 0 \leq t \leq 1.$$

Для определения INL_j представим напряжения кодовых переходов испытываемого АЦП через амплитудные значения реального ИС $x(t)$, то есть

$$V_j \cong V_0 + (V_{N-2} - V_0)t_j + \sum_{i=1}^S a_i \sin(i\pi t_j), \quad 0 \leq t_j \leq 1.$$

Тогда интегральная нелинейность INL_j (1) для j -го кода АЦП будет равна

$$INL_j = \frac{(V_j - V_0)(N-2)}{V_{N-2} - V_0} - j \cong (N-2)t_j + \sum_{i=1}^S a_i \sin(i\pi t_j) - j, \quad j=1,2,\dots, N-3.$$

В полученном выражении коэффициенты a_i представлены относительно h_H .

Для вычисления t_j используем гистограмму распределения кодов АЦП, где общее число отсчетов связано с частотой дискретизации f_d АЦП. Так как период дискретизации АЦП является константой, то оценка времени кодового перехода t'_j для j -го кода АЦП будет линейна пропорциональна числу отсчетов на интервале от $t_0 = 0$ до t_j . То есть через количество появлений кодов АЦП n_i можно оценить t_j . Например (см. рисунок), $n_1 = 10$ – количество появлений первого кода АЦП на интервале от $t_0 = 0$ до t_1 , которое соответствует смене выходного кода АЦП с 1 на 2. Далее, $n_1 + n_2 = 14$ – количество появлений первого и второго кодов АЦП на интервале от $t_0 = 0$ до t_2 , которое соответствует смене выходного кода АЦП с 2 на 3. Таким образом, $n_1 + n_2 + \dots + n_i$ – количество появлений кодов АЦП на интервале от $t_0 = 0$ до t_j , которое соответствует смене выходного кода АЦП с j на $j+1$, то есть

$$t'_j = \sum_{i=1}^j n_i, \quad j=1,2,\dots,N-2.$$

Поскольку выходной код АЦП меняется с $N-2$ на $N-1$ при $t_{N-2}=1$, то общее количество появлений кодов АЦП на интервале от $t_0=0$ до $t_{N-2}=1$ определяется следующим образом:

$$n_1 + n_2 + \dots + n_{N-2} = \sum_{i=1}^{N-2} n_i.$$

Сделаем рассматриваемый метод универсальным с помощью масштабного коэффициента $T_M = \left(\sum_{i=1}^{N-2} n_i \right)^{-1}$ и перейдем от t'_j к нормированной оценке времени кодового перехода $\tilde{t}_j$

для j -го кода АЦП $\tilde{t}_j = T_M \sum_{i=1}^j n_i, \quad j=1,2,\dots, N-2.$

Условие смены выходного кода АЦП с j на $j+1$ можно представить как $\tilde{t}_j \leq t_j < \tilde{t}_j + T_M$.

Поэтому оценка t_j через количество появлений кодов АЦП n_i имеет неопределенность не более одного отсчета АЦП. Погрешность оценки t_j может быть уменьшена путем увеличения общего числа отсчетов в гистограмме.

Для этого на вход испытываемого АЦП вместо ИС $x(t)$ подают периодический ИС треугольной формы $x_T(t)$ в виде:

$$x_T(t) = \begin{cases} V_0 + 2(V_{N-2} - V_0)(m \times t - z + 1) + F'\left(t - \frac{z-1}{m}\right), & \frac{z-1}{m} \leq t \leq \frac{z-0,5}{m} \\ V_0 - 2(V_{N-2} - V_0)(m \times t - z) - F''\left(\frac{z}{m} - t\right), & \frac{z-0,5}{m} < t \leq \frac{z}{m} \end{cases}, \quad (3)$$

где m – число периодов ИС, z – порядковый номер периода ИС, $F'\left(t - \frac{z-1}{m}\right)$ – нелинейная составляющая на возрастающем участке ИС, $F''\left(\frac{z}{m} - t\right)$ – нелинейная составляющая на убывающем участке ИС, $F(0) = F'\left(\frac{2z-1}{2m}\right) = F''\left(\frac{z}{m}\right) = 0$.

Итоговое выражение для оценки t_j :

$$t_j \cong t'_j = \tilde{t}_j = T_M \sum_{i=1}^j n_i, \quad j=1,2,\dots, N-2.$$

Данное выражение применимо как для ИС $x(t)$ вида (2), так и для ИС $x_T(t)$ вида (3), поэтому для упрощения вывода, в дальнейшем будет использовать ИС $x(t)$ вида $x(t) = V_0 + (V_{N-2} - V_0)t + F(t)$.

С учетом этого оценка интегральной нелинейности $\tilde{I\tilde{N}L}_j$ для j -го кода АЦП равна

$$\tilde{I\tilde{N}L}_j \cong \kappa \times \tilde{t}_j + \sum_{i=1}^S a_i \sin(i\pi \tilde{t}_j) - j, \quad j=1,2,\dots, N-3,$$

где $\kappa = N-2$ – количество интервалов квантований испытываемого АЦП.

При линейном ИС коэффициенты a_i равны нулю, и для известного гистограммного метода испытания АЦП $\tilde{I\tilde{N}L}_j$ определяется следующим образом: $\tilde{I\tilde{N}L}_j = \kappa \times \tilde{t}_j - j$.

В случае реального ИС $x(t)$ коэффициенты a_i не равны нулю, в результате нелинейность АЦП и нелинейная составляющая $F(t)$ ИС будут связаны друг с другом, и задача их одновременного определения не представляется выполнимой.

Поэтому на вход испытываемого АЦП последовательно подают ИС $x_1(t) = V_0 + (V_{N-2} - V_0)t + F(t)$, смещенный по уровню вниз ИС $x_2(t) = V_0 + (V_{N-2} - V_0)t + F(t) - \gamma_1$ и смещенный по уровню вверх ИС $x_3(t) = V_0 + (V_{N-2} - V_0)t + F(t) + \gamma_2$.

Смещение исходного ИС $x_1(t)$ по уровню вниз и вверх позволяет найти коэффициенты a_i и в итоге определить $\tilde{N}L_j$ для каждого кода АЦП, за исключением минимального и максимального.

Измерительные сигналы $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ идентичны (линейные и нелинейные составляющие равны друг другу), за исключением неизвестного, но фиксированного напряжения смещения между ними (γ_1 и γ_2). По этой причине время кодового перехода t_j для одного и того же j -го кода АЦП при отсутствии смещения ИС и при смещении ИС вниз и вверх будет отличаться и поэтому обозначается по-разному.

Условие равенства реального напряжения кодового перехода АЦП с измерительными сигналами $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ выглядит следующим образом:

$$V_j = x(t_j), j = 0, 1, \dots, N-2,$$

$$V_j = x(t_j^{(-)}), j = 0, 1, \dots, N-2,$$

$$V_j = x(t_j^{(+)}), j = 0, 1, \dots, N-2,$$

где $t_j^{(-)}$ – время кодового перехода для j -го кода АЦП при смещенном вниз ИС $x_2(t)$ относительно исходного ИС $x_1(t)$; $t_j^{(+)}$ – время кодового перехода для j -го кода АЦП при смещенном вверх ИС $x_3(t)$ относительно исходного ИС $x_1(t)$.

Смещенному вниз ИС $x_2(t)$ требуется больше времени по сравнению с исходным ИС $x_1(t)$ для достижения V_j ($t_j < t_j^{(-)}$), а смещенному вверх ИС $x_3(t)$ требуется меньше времени по сравнению с исходным ИС $x_1(t)$ для достижения V_j ($t_j > t_j^{(+)}$).

Строят первую гистограмму распределения кодов АЦП при отсутствии смещения ИС, вторую и третью гистограммы при смещении ИС вниз и вверх. С помощью первой гистограммы распределения кодов АЦП вычисляют $\tilde{t}_j$:

$$\tilde{t}_j = \frac{\sum_{i=1}^j n_i}{\sum_{i=1}^{N-2} n_i}, j = 1, 2, \dots, N-2.$$

С помощью второй гистограммы распределения кодов АЦП вычисляют $\tilde{t}_j^{(-)}$:

$$\tilde{t}_j^{(-)} = \frac{\sum_{i=1}^j n_i^{(-)} - [n_0 - n_0^{(-)}]}{\sum_{i=1}^{N-2} n_i}, j = 1, 2, \dots, N-2,$$

где $\tilde{t}_j^{(-)}$ – нормированная оценка времени кодового перехода для j -го кода АЦП при смещенном вниз ИС относительно исходного ИС; $n_i^{(-)}$ – количество появлений кодов АЦП по

второй гистограмме; n_0 – количество появлений кода из одних нулей (код 0) по первой гистограмме; $n_0^{(-)}$ – количество появлений кода из одних нулей (код 0) по второй гистограмме.

С помощью третьей гистограммы распределения кодов АЦП вычисляют $\tilde{t}_j^{(+)}$:

$$\tilde{t}_j^{(+)} = \frac{\sum_{i=1}^j n_i^{(+)} - n_0}{\sum_{i=1}^{N-2} n_i}, \quad j = 1, 2, \dots, N-2,$$

где $\tilde{t}_j^{(+)}$ – нормированная оценка времени кодового перехода для j -го кода АЦП при смещенном вверх ИС относительно исходного ИС; $n_i^{(+)}$ – количество появлений кодов АЦП по третьей гистограмме.

Покажем, почему одного смещения исходного ИС (вниз или вверх) не достаточно для определения вклада нелинейной составляющей ИС в интегральную нелинейность для каждого кода испытываемого АЦП.

1. *Определение коэффициентов a_i и интегральной нелинейности для j -го кода АЦП при смещении исходного ИС по уровню вниз.*

Составляют первое уравнение для j -го кода АЦП:

$$\tilde{I}NL_j \cong \kappa \times \tilde{t}_j + \sum_{i=1}^S a_i \sin(i\pi \tilde{t}_j) - j, \quad j = 1, 2, \dots, N-3, \quad i = 1, 2, \dots, S, \quad S \leq 10, \quad (4)$$

где $\tilde{I}NL_j$ – оценка интегральной нелинейности для j -го кода АЦП по первой гистограмме.

Составляют второе уравнение для j -го кода АЦП:

$$\tilde{I}NL_j^{(-)} \cong \kappa \times \tilde{t}_j^{(-)} + \sum_{i=1}^S a_i \sin(i\pi \tilde{t}_j^{(-)}) - \gamma_1 - j, \quad i = 1, 2, \dots, S, \quad S \leq 10, \quad \tilde{t}_j^{(-)} \leq 1, \quad (5)$$

где $\tilde{I}NL_j^{(-)}$ – оценка интегральной нелинейности для j -го кода АЦП по второй гистограмме.

Поскольку составленные уравнения относятся к одному АЦП, то они равны при одном и том же индексе j . Поэтому два уравнения (4) и (5) приводят к одному, приравняв их правые части между собой, для исключения нелинейности АЦП:

$$\kappa \times \tilde{t}_j + \sum_{i=1}^S a_i \sin(i\pi \tilde{t}_j) - j = \kappa \times \tilde{t}_j^{(-)} + \sum_{i=1}^S a_i \sin(i\pi \tilde{t}_j^{(-)}) - \gamma_1 - j, \quad \tilde{t}_j^{(-)} \leq 1.$$

Переносят известные члены уравнения в левую часть, а все неизвестные в правую часть:

$$\kappa \times (\tilde{t}_j^{(-)} - \tilde{t}_j) = \sum_{i=1}^S a_i \left[\sin(i\pi \tilde{t}_j) - \sin(i\pi \tilde{t}_j^{(-)}) \right] + \gamma_1, \quad \tilde{t}_j^{(-)} \leq 1.$$

В итоге общее число уравнений будет значительно больше, чем число неизвестных a_i и γ_1 . Например, у АЦП с разрешением более 10 бит всегда будет $N > 1000$, в то время как число неизвестных не более 11. Поэтому неизвестные $a_1, \dots, a_S$ и γ_1 могут быть найдены с помощью метода наименьших квадратов.

Решение по методу наименьших квадратов для оценки неизвестных может быть представлено в следующем виде:

$$\{a_1, \dots, a_S, \gamma_1\} = \arg \min \left\{ \sum_{j=1, \tilde{t}_j^{(-)} \leq 1}^{N-3} \left[\kappa (\tilde{t}_j^{(-)} - \tilde{t}_j) - \left(\sum_{i=1}^S a_i \left[\sin(i\pi \tilde{t}_j) - \sin(i\pi \tilde{t}_j^{(-)}) \right] + \gamma_1 \right) \right]^2 \right\}.$$

Учитывая γ_1 и вклад нелинейной составляющей ИС (коэффициенты a_i) в интегральную нелинейность для j -го кода АЦП, определяют $\tilde{I\tilde{N}L}_j^{(-)}$ с помощью уравнения (5).

Значение напряжения смещения γ_1 между $x_1(t)$ и $x_2(t)$ влияет на точность оценки $\tilde{I\tilde{N}L}_j^{(-)}$. Чем меньше γ_1 , тем больше шум АЦП оказывает негативное влияние на точность определения неизвестных $a_1, \dots, a_S$. С другой стороны, чем больше γ_1 , тем больше участок амплитудного диапазона АЦП, в котором не удастся учесть нелинейную составляющую ИС при определении $\tilde{I\tilde{N}L}_j^{(-)}$.

Для определения вклада нелинейной составляющей ИС в интегральную нелинейность для кодов АЦП в диапазоне от $V_{N-2} - \gamma_1$ до V_{N-2} необходим смещенный по уровню вверх ИС $x_3(t)$.

2. *Определение коэффициентов a_i и интегральной нелинейности для j -го кода АЦП при смещении исходного ИС по уровню вверх.*

Составляют первое уравнение для j -го кода АЦП (совпадает с уравнением 4):

$$\tilde{I\tilde{N}L}_j \cong \kappa \times \tilde{t}_j + \sum_{i=1}^S a_i \sin(i\pi \tilde{t}_j) - j, \quad j=1,2,\dots, N-3, \quad i=1,2,\dots,S, \quad S \leq 10. \quad (6)$$

Составляют второе уравнение для j -го кода АЦП:

$$\tilde{I\tilde{N}L}_j^{(+)} \cong \kappa \times \tilde{t}_j^{(+)} + \sum_{i=1}^S a_i \sin(i\pi \tilde{t}_j^{(+)}) + \gamma_2 - j, \quad i=1,2,\dots,S, \quad S \leq 10, \quad \tilde{t}_j^{(+)} > 0, \quad (7)$$

где $\tilde{I\tilde{N}L}_j^{(+)}$ – оценка интегральной нелинейности для j -го кода АЦП по третьей гистограмме.

Уравнения (6) и (7) приводят к одному, приравняв их правые части между собой, для исключения нелинейности АЦП

$$\kappa \times \tilde{t}_j + \sum_{i=1}^S a_i \sin(i\pi \tilde{t}_j) - j = \kappa \times \tilde{t}_j^{(+)} + \sum_{i=1}^S a_i \sin(i\pi \tilde{t}_j^{(+)}) + \gamma_2 - j, \quad \tilde{t}_j^{(+)} > 0.$$

Переносят известные члены уравнения в левую часть, а все неизвестные – в правую часть и находят неизвестные с помощью метода наименьших квадратов:

$$\{a_1, \dots, a_S, \gamma_2\} = \arg \min \left\{ \sum_{j=1, \tilde{t}_j^{(+)} > 0}^{N-3} \left[\kappa (\tilde{t}_j^{(+)} - \tilde{t}_j) - \left(\sum_{i=1}^S a_i \left[\sin(i\pi \tilde{t}_j) - \sin(i\pi \tilde{t}_j^{(+)}) \right] - \gamma_2 \right) \right]^2 \right\}.$$

Учитывая γ_2 и вклад нелинейной составляющей ИС (коэффициенты a_i) в интегральную нелинейность для j -го кода АЦП, определяют $\tilde{I\tilde{N}L}_j^{(+)}$ с помощью уравнения (7).

Объединяют $\tilde{I\tilde{N}L}_j^{(-)}$ с $\tilde{I\tilde{N}L}_j^{(+)}$ и получают оценку интегральной нелинейности для каждого кода АЦП ($\tilde{I\tilde{N}L}_j^{\cup}$), за исключением минимального и максимального. Используя $\tilde{I\tilde{N}L}_j^{\cup}$, находят $DNL_j = \tilde{I\tilde{N}L}_j^{\cup} - \tilde{I\tilde{N}L}_{j-1}^{\cup}$.

Кроме того, с помощью DNL_j можно найти абсолютные значения интервалов квантования h_j испытываемого АЦП следующим образом: $h_j = h_H + DNL_j \times h_H$.

По зависимостям h_j , DNL_j , $\tilde{I\tilde{N}L}_j^{\cup}$ от текущего кода испытываемого АЦП можно определить предельные значения, средние значения, среднеквадратические отклонения дифференциальной и интегральной нелинейности, построить реальную ФП испытываемого АЦП.

Заключение

Предложен новый метод метрологического испытания, снижающий требования к эталонным средствам измерений по классу точности за счет учета нелинейной составляющей ИС при определении интегральной и дифференциальной нелинейностей АЦП. Это достигается за счет двух смещений входного сигнала, что значительно сокращает время проведения метрологического испытания, по сравнению с методом скользящей гистограммы.

Нахождение напряжений смещений γ_1 и γ_2 является дополнительным преимуществом предлагаемого метода, позволяющим снизить требования к точности задания сигнала перемещения. Детальный анализ показал, что смещение исходного ИС по уровню вниз или вверх на величину, равную одной четверти входного диапазона АЦП, подходит для нового метода. Смещение исходного ИС по уровню вниз или вверх на величину более одной трети входного диапазона АЦП ведет к снижению точности определения коэффициентов a_i и интегральной нелинейности АЦП.

Библиографический список

1. Закон Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008 №102-ФЗ (в редакции от 13.07.2015). 16 с.
2. **Абрамов А.М., Бондарцев В.В., Гуржин С.Г. и др.** Виртуальные метрологические средства испытаний модулей АЦП для систем бортовых измерений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 50-1. С. 50-54.
3. **Абрамов А.М., Гуржин С.Г., Жулев В.И. и др.** Математическое и имитационное моделирование измерительных модулей аналого-цифрового преобразования // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 50-2. С. 36-41.
4. **Абрамов А. М., Бондарцев В. В., Гуржин С. Г. и др.** Виртуальные метрологические средства испытаний модулей АЦП для систем бортовых измерений: монография Рязань: ИП Коняхин А. В., 2017. 256 с.
5. **Абрамов А.М., Каплан М.Б., Никитин С.В. и др.** Методы и средства автоматизации измерений и испытаний сложных объектов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 60. С. 172-182.
6. Аналого-цифровое преобразование / под ред. У. Кестера. – М.: Техносфера, 2007. – 1016 с.

UDC 621.317.1: 621.3.087.92

RECOGNIZING NONLINEAR COMPONENT OF MEASUREMENT SIGNAL BY LINKED HISTOGRAMS DURING ADC METROLOGICAL TESTS

A. M. Abramov, PhD (in technical sciences), associate professor, department of information measurement and biomedical equipment, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0009-0006-7274-5206, e-mail: abramov.a.job@yandex.ru

*The task to find the contribution of nonlinear component of measurement signal (MS) during metrological tests to ADC integral nonlinearity is considered. **The aim of the work is to determine ADC integral and differential nonlinearities by means of a new method, which reduces the requirements to reference measuring instruments in terms of accuracy class by taking into account MS nonlinear component. For this purpose, periodic MS of triangular shape, level-shifted downward MS and level-shifted upward MS are successively fed to the input of tested ADC. The first histogram of ADC code distribution is plotted in the absence of MS offset, second and third histograms are plotted in the case of MS downward and upward shifting. After that, for each ADC code in the second and third histograms with the help of the first histogram the authors construct two equations leading to a single one and solve the obtained systems of equations at MS offset down and up by the least squares method, determining MS offset and the contribution of MS nonlinear component to integral nonlinearity for each ADC code. Considering MS nonlinear component, integral nonlinearity***

arity for each ADC code is determined, and then differential nonlinearity of ADC is determined from integral nonlinearity.

Keywords: measurement signal, offset, nonlinear component, integral nonlinearity, differential nonlinearity, analog-to-digital converter, histogram, least squares method, conversion function.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-88-95-105

References

1. Закон Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008 no/ 102-FZ (в редакции от 13.07.2015), 16 p. (in Russian).
2. Abramov A.M., Bondarcev V.V., Gurzhin S.G. i dr. Virtual'nye metrologicheskie sredstva ispytaniy modulej ACP dlya sistem bortovyh izmerenij. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radio-tekhnicheskogo universiteta*. 2014, no. 50-1, pp. 50-54. (in Russian).
3. Abramov A.M., Gurzhin S.G., Zhulev V.I. i dr. Matematicheskoe i imitacionnoe modelirovanie izmeritel'nyh modulej analogo-cifrovogo preobrazovaniya . *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radio-tekhnicheskogo universiteta*. 2014, no. 50-2, pp. 36-41. (in Russian).
4. Abramov A.M., Bondarcev V.V., Gurzhin S.G. i dr. Virtual'nye metrologicheskie sredstva ispytaniy modulej ACP dlya sistem bortovyh izmerenij: monografiya Ryazan' IP Konyahin A.V., 2017, 256 p. (in Russian).
5. Abramov A.M., Kaplan M.B., Nikitin S.V. i dr. Metody i sredstva avtomatizacii izmerenij i ispytaniy slozhnyh ob"ektov. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2017, no. 60, pp. 172-182. (in Russian).
6. *Analogo-cifrovoe preobrazovanie* / pod red. U. Kestera. – M.: Tekhnosfera, 2007. – 1016 p. (in Russian).