

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.317.1: 621.3.087.92

ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭФФЕКТОВ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ НА ТОЧНОСТЬ МЕТОДА СВЯЗАННЫХ ГИСТОГРАММ ПРИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОМ ИСПЫТАНИИ 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 требований к аппаратным средствам системы метрологического испытания по методу связанных гистограмм для обеспечения точности измерения интегральной нелинейности (INL) АЦП на уровне 1LSB (наименьший значащий бит). Целью работы является оценка точности метода связанных гистограмм при нестационарных эффектах испытательной среды. Найдены зависимости для метода связанных гистограмм, показывающие, что погрешность в определении INL АЦП при смещении измерительного сигнала (ИС) вниз или вверх определяется отношением максимальной величины дрейфа опорного уровня ИС к произведению напряжения смещения ИС и номинального интервала квантования АЦП. Предложена методика снижения влияния нестационарных эффектов испытательной среды на точность метода связанных гистограмм, заключающаяся в объединении функций INL, полученных при сдвиге опорного уровня исходного ИС вниз и вверх, и усреднения их общей части.

Ключевые слова: нестационарные эффекты, система метрологического испытания, аналого-цифровой преобразователь, измерительный сигнал, интегральная нелинейность, погрешность оценки, гистограмма, время кодового перехода, цифроаналоговый преобразователь.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-91-249-255

Введение

Современные аналого-цифровые преобразователи (АЦП) относятся к классу наиболее распространенных компонентов высокоточной измерительной техники, а их поверка является хорошо известной и сложной проблемой [1, 2].

В настоящее время в литературе описано много методов и приемов исследования метрологических свойств АЦП, реализуемых с помощью автоматизированной контрольно-измерительной аппаратуры с применением средств вычислительной техники. Основой для построения современной системы метрологического испытания АЦП, как правило, служит образцовый цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) с допускаемыми погрешностями в пределах 0,1-0,5 от предела допустимой контролируемой погрешности АЦП.

Такие требования к точности образцовых средств измерений (СИ) на сегодня становятся реально невыполнимыми при метрологической аттестации прецизионных АЦП.

Для решения этой проблемы был разработан и запатентован новый метод метрологического испытания АЦП (патент РФ № 2828783), названный методом связанных гистограмм, позволяющий снизить требования к эталонным средствам измерений по классу точности за счет учета нелинейной составляющей измерительного сигнала (ИС) при определении функции INL АЦП [3].

В работе [4] был проведен анализ источников погрешностей, влияющих на точность оценки функции INL АЦП по методу связанных гистограмм. Анализ показал, что при условии подачи трех идентичных ИС на вход АЦП, за исключением фиксированного напряжения

смещения между ними и значения этого напряжения больше, чем 0.1 % от входного диапазона испытываемого АЦП, можно утверждать, что ни один из источников погрешностей не будет оказывать влияния на точность оценки нелинейной составляющей ИС.

Система метрологического испытания статических характеристик прецизионных АЦП по методу связанных гистограмм

Для осуществления метода связанных гистограмм предлагается система метрологического испытания (см. рисунок), содержащая генератор ИС (ЦАП1), источник сигнала перемещения ИС (ЦАП2), аналоговый сумматор, микроконтроллер (МК) и ЭВМ.

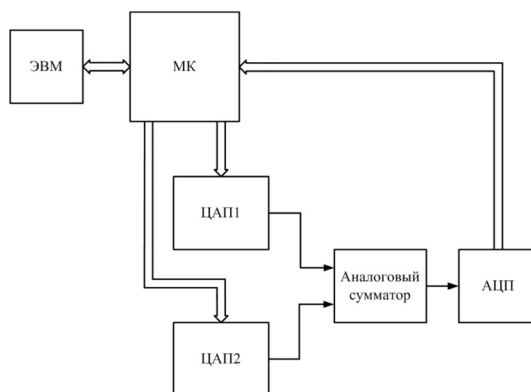


Рисунок – Структурная схема системы метрологического испытания статических характеристик прецизионных АЦП по методу связанных гистограмм
Figure – Structural diagram of the system of metrological testing of precision ADCs static characteristics by method of related histograms

Система метрологического испытания по методу связанных гистограмм работает следующим образом. Исходный ИС с выходным диапазоном, равным входному диапазону испытываемого АЦП, сформированный с помощью ЦАП1, подают на первый вход аналогового сумматора. При этом исходный ИС с выхода аналогового сумматора вначале формируют так, чтобы нижняя граница исходного ИС соответствовала минимальному напряжению кодового перехода АЦП, в результате чего МК фиксирует соответствующие коды с испытываемого АЦП и передает эти коды на ЭВМ для определения первой гистограммы распределения кодов АЦП, с помощью которой вычисляет время кодовых переходов АЦП. Затем исходный ИС смещают по уровню вниз. Для этого подают на второй вход аналогового сумматора соответствующее напряжение с ЦАП2 и фиксируют коды с испытываемого АЦП МК, который в свою очередь, передает эти коды на ЭВМ. При этом ЭВМ определяет вторую гистограмму распределения кодов АЦП, с помощью которой вычисляет время кодовых переходов АЦП при смещенном вниз ИС. Далее смещают исходный ИС по уровню вверх. При этом ЭВМ определяет третью гистограмму распределения кодов АЦП, с помощью которой вычисляет время кодовых переходов АЦП при смещенном вверх ИС. С помощью вычисленного времени кодовых переходов АЦП при исходном ИС и смещенных ИС ЭВМ определяет вклад нелинейной составляющей ИС в INL АЦП [5]. Учитывая нелинейную составляющую ИС, ЭВМ определяет функцию INL АЦП, по которой определяет дифференциальную нелинейность (DNL) АЦП. Наконец, ЭВМ по DNL АЦП определяет абсолютные значения интервалов квантований АЦП и строит реальную функцию преобразования АЦП.

Важно отметить, что разрядность ЦАП1 должна быть больше разрядности АЦП, иначе дискретность выходного сигнала ЦАП1 может затруднить определение DNL АЦП. Если данное требование невыполнимо, то для формирования линейно нарастающего сигнала можно использовать генератор тока на основе операционного усилителя и накопительного конденсатора.

Существует три важных требования к системе метрологического испытания по методу связанных гистограмм (см. рисунок).

1. Разрядность ЦАП1 (генератора ИС) должна быть больше разрядности испытываемого АЦП (K) минимум на 2 бита.

2. Формируемые с помощью ЦАП1, ЦАП2 и аналогового сумматора входные ИС для АЦП должны быть идентичны, за исключением фиксированного напряжения смещения между ними.

3. Напряжение смещения между ИС должно быть постоянным во времени.

Однако различные изменяющиеся во времени эффекты, такие, например, как дрейф опорного напряжения ЦАП или изменение наклона ФП ЦАП, могут привести к нарушению 2 и/или 3 требования к системе метрологического испытания и снизить точность метода связанных гистограмм.

Рассмотрим влияние нестационарных эффектов на результаты испытаний АЦП по методу связанных гистограмм.

Влияние нестационарных эффектов системы метрологического испытания на точность метода связанных гистограмм

Одним из нестационарных эффектов является разница температур между различными функциональными блоками ЦАП. Так, при повышении температуры может измениться опорное напряжение ЦАП1 (см. рисунок), что приведет к формированию различных исходных ИС: $x_1(t)$ и $\tilde{x}_1(t)$. Из-за разницы между $x_1(t)$ и $\tilde{x}_1(t)$ появляется непостоянное смещение между ИС.

Еще одним нестационарным эффектом является периодическое изменение напряжения питания, которое может привести к непостоянному смещению $\tilde{\gamma}_1$:

$$\tilde{\gamma}_1 = \gamma_1 + \Upsilon \sin(\omega t),$$

где Υ – амплитуда погрешности, вызванная периодическими изменениями напряжения питания; ω – частота погрешности, обычно равная частоте изменения напряжения питания.

Для обозначения общей разницы между различными исходными ИС будем использовать $\varepsilon_1(t) = x_1(t) - \tilde{x}_1(t)$, а $\varepsilon_2(t) = \tilde{\gamma}_1 - \gamma_1$ для обозначения непостоянного смещения между ИС.

При смещении ИС $\tilde{x}_1(t)$ по уровню вниз на величину, равную $\tilde{\gamma}_1$, получаем $x_2(t)$:

$$x_2(t) = x_1(t) - \gamma_1 - \varepsilon(t),$$

где $\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$ – основная погрешность, возникающая из-за нестационарных эффектов, нарушающих второе и третье требования к системе метрологического испытания по методу связанных гистограмм.

Для оценки влияния $\varepsilon(t)$ на результаты испытаний по методу связанных гистограмм составим два уравнения для одного и того же напряжения кодового перехода АЦП:

$$\tilde{V}'_j = V_0 + A_V \times \tilde{t}_j + \sum_{i=1}^S a_i \sin(i\pi \tilde{t}_j), S \leq 30, \quad (1)$$

где $\tilde{V}'_j$ – оценка j -го напряжения кодового перехода АЦП по первой гистограмме; V_0 – минимальное напряжение кодового перехода АЦП; A_V – входной диапазон АЦП; $\tilde{t}_j$ – нормированная оценка интервала времени от минимального значения исходного ИС до мгновенного значения исходного ИС при котором выходной код АЦП изменится с j на $j+1$, a_i – коэффициенты синусоидальных функций.

$$\tilde{V}''_j = V_0 + A_V \times \tilde{t}_j^{(-)} + \sum_{i=1}^S a_i \sin(i\pi \tilde{t}_j^{(-)}) - \gamma_1 - \varepsilon(\tilde{t}_j^{(-)}), \quad (2)$$

где $\tilde{V}''_j$ – оценка j -го напряжения кодового перехода АЦП по второй гистограмме с учетом нестационарных эффектов испытательной среды; $\tilde{t}_j^{(-)}$ – нормированная оценка интервала времени от минимального значения смещенного ИС до мгновенного значения смещенного

ИС при котором выходной код АЦП изменится с j на $j+1$, γ_1 – значение напряжения смещения ИС.

Найдем разницу между уравнениями (1) и (2):

$$A_V \left(\tilde{t}_j - \tilde{t}_j^{(-)} \right) + \sum_{i=1}^S a_i \left[\sin(i\pi \tilde{t}_j) - \sin(i\pi \tilde{t}_j^{(-)}) \right] + \gamma_1 + \varepsilon \left(\tilde{t}_j^{(-)} \right) = 0. \quad (3)$$

Если решить уравнение (3) с помощью метода наименьших квадратов без учета $\varepsilon \left(\tilde{t}_j^{(-)} \right)$, то мы получим другую оценку неизвестных γ'_1 и $a'_1, \dots, a'_S$, отличную от своих истинных значений γ_1 и $a_1, \dots, a_S$:

$$\zeta(\gamma'_1, a'_S) = \sum_{j=0}^{N-2} \left[A_V \left(\tilde{t}_j - \tilde{t}_j^{(-)} \right) + \sum_{i=1}^S a_i \left[\sin(i\pi \tilde{t}_j) - \sin(i\pi \tilde{t}_j^{(-)}) \right] + \gamma_1 \right]^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $N = 2^K$ – максимальное число кодовых комбинаций АЦП.

Приравняв к нулю частные производные функции $\zeta(\gamma_1, a_S)$ по γ_1 и $a_1, a_2, \dots, a_{30}$, получим систему нормальных уравнений, решение которых определит значения неизвестных.

$$\begin{cases} \gamma_1 \mathcal{G} + a_1 \sum_{j=1}^{\mathcal{G}} \delta_1 + a_2 \sum_{j=1}^{\mathcal{G}} \delta_2 + \dots + a_{30} \sum_{j=1}^{\mathcal{G}} \delta_3 = \sum_{j=1}^{\mathcal{G}} w \\ \gamma_1 \sum_{j=1}^{\mathcal{G}} \delta_1 + a_1 \sum_{j=1}^{\mathcal{G}} \delta_1^2 + a_2 \sum_{j=1}^{\mathcal{G}} (\delta_2 \times \delta_1) + \dots + a_{30} \sum_{j=1}^{\mathcal{G}} (\delta_3 \times \delta_1) = \sum_{j=1}^{\mathcal{G}} (w \times \delta_1) \\ \gamma_1 \sum_{j=1}^{\mathcal{G}} \delta_2 + a_1 \sum_{j=1}^{\mathcal{G}} (\delta_1 \times \delta_2) + a_2 \sum_{j=1}^{\mathcal{G}} \delta_2^2 + \dots + a_{30} \sum_{j=1}^{\mathcal{G}} (\delta_3 \times \delta_2) = \sum_{j=1}^{\mathcal{G}} (w \times \delta_2), \\ \vdots \\ \gamma_1 \sum_{j=1}^{\mathcal{G}} \delta_3 + a_1 \sum_{j=1}^{\mathcal{G}} (\delta_1 \times \delta_3) + a_2 \sum_{j=1}^{\mathcal{G}} (\delta_2 \times \delta_3) + \dots + a_{30} \sum_{j=1}^{\mathcal{G}} \delta_3^2 = \sum_{j=1}^{\mathcal{G}} (w \times \delta_3) \end{cases}$$

где $\mathcal{G}$ – количество интервалов квантований АЦП попавших в амплитудный диапазон смещенного по уровню вниз ИС, $\delta_1 = \sin(\pi \tilde{t}_j) - \sin(\pi \tilde{t}_j^{(-)})$, $\delta_2 = \sin(2\pi \tilde{t}_j) - \sin(2\pi \tilde{t}_j^{(-)})$, $\delta_3 = \sin(30\pi \tilde{t}_j) - \sin(30\pi \tilde{t}_j^{(-)})$, $w = -A_V \left(\tilde{t}_j - \tilde{t}_j^{(-)} \right)$.

Система уравнений решается по теореме Крамера, т. е. вычислением определителей [6]. Вычисленные неизвестные γ'_1 и $a'_1, \dots, a'_S$ по (4) не равны своим истинным значениям γ_1 и $a_1, \dots, a_S$, поскольку $\varepsilon \left(\tilde{t}_j^{(-)} \right)$ вносит ошибку, что видно из приведенного ниже анализа:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^S a_i \left[\sin(i\pi \tilde{t}_j) - \sin(i\pi \tilde{t}_j^{(-)}) \right] + \gamma_1 + \varepsilon \left(\tilde{t}_j^{(-)} \right) &\approx A_V \left(\tilde{t}_j^{(-)} - \tilde{t}_j \right) \approx \\ &\approx \sum_{i=1}^S a'_i \left[\sin(i\pi \tilde{t}_j) - \sin(i\pi \tilde{t}_j^{(-)}) \right] + \gamma'_1. \end{aligned} \quad (5)$$

Коэффициенты $a'_1, \dots, a'_S$ в (5) обозначим через сумму истинных значений a_i и ошибок v_i , которые вносит $\varepsilon \left(\tilde{t}_j^{(-)} \right)$:

$$a'_i = a_i + v_i. \quad (6)$$

Подставим (6) в (5):

$$\varepsilon\left(\tilde{t}_j^{(-)}\right) \approx \sum_{i=1}^S v_i \left[\sin\left(i\pi\tilde{t}_j\right) - \sin\left(i\pi\tilde{t}_j^{(-)}\right) \right]. \quad (7)$$

Выражение (7) также можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^S v_i \left[\sin\left(i\pi\tilde{t}_j\right) - \sin\left(i\pi\tilde{t}_j^{(-)}\right) \right] &\approx \sum_{i=1}^S v_i \times \left(\tilde{t}_j - \tilde{t}_j^{(-)} \right) \frac{d}{dt} \sin\left(i\pi\tilde{t}_j^{(-)}\right) \approx \\ &\approx - \sum_{i=1}^S v_i \times \gamma_1 \frac{d}{dt} \sin\left(i\pi\tilde{t}_j^{(-)}\right) \approx \varepsilon\left(\tilde{t}_j^{(-)}\right). \end{aligned} \quad (8)$$

Полученное выражение (8) является справедливым при условии, что напряжение смещения γ_1 намного меньше входного диапазона испытываемого АЦП.

Интегрирование (8) даст искомую погрешность оценки нелинейной составляющей ИС $F_v\left(\tilde{t}_j^{(-)}\right)$ из-за влияния нестационарных эффектов испытательной среды:

$$F_v\left(\tilde{t}_j^{(-)}\right) = \sum_{i=1}^S v_i \sin\left(i\pi\tilde{t}_j^{(-)}\right) \approx -\frac{1}{\gamma_1} \int_0^{\tilde{t}_j^{(-)}} \varepsilon(t) dt. \quad (9)$$

Если использовать оценку неизвестных $a'_1, \dots, a'_S$ из (4) в выражении (2), то получим:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_j'' &= V_0 + A_v \times \tilde{t}_j^{(-)} + \sum_{i=1}^S a'_i \sin\left(i\pi\tilde{t}_j^{(-)}\right) - \gamma_1 = \\ &= V_0 + A_v \times \tilde{t}_j^{(-)} + \sum_{i=1}^S a_i \sin\left(i\pi\tilde{t}_j^{(-)}\right) + \sum_{i=1}^S v_i \sin\left(i\pi\tilde{t}_j^{(-)}\right) - \gamma_1 = V_j + F_v\left(\tilde{t}_j^{(-)}\right), \end{aligned} \quad (10)$$

где V_j – действительное значение j -го напряжения кодового перехода АЦП.

В случае изменения дрейфа опорного уровня ИС по линейному закону:

$$F_v\left(\tilde{t}_j^{(-)}\right) = -\frac{1}{\gamma_1} \int_0^{\tilde{t}_j^{(-)}} \hat{\Delta} t dt = -\frac{\hat{\Delta}}{2\gamma_1} \left[\tilde{t}_j^{(-)} \times \tilde{t}_j^{(-)} \right], \quad (11)$$

где $\hat{\Delta}$ – ошибка, возникающая из за непостоянного во времени смещения ИС.

Тогда, погрешность оценки коэффициентов $a_1, \dots, a_S$ и напряжений кодовых переходов АЦП достигнет своего максимального значения ближе к концу входного диапазона АЦП:

$$F_v(1) = -\frac{\hat{\Delta}}{2\gamma_1}. \quad (12)$$

Несмотря на то, что $\hat{\Delta}$ может оказаться малой величиной, по сравнению с γ_1 , она все равно может серьезно повлиять на точность оценки напряжений кодовых переходов АЦП. Поэтому для уменьшения влияния ошибки $\hat{\Delta}$ желательно увеличить значение напряжения смещения γ_1 .

В итоге, погрешность оценки j -го напряжения кодового перехода АЦП $\Delta\tilde{V}_j$ из-за влияния нестационарных эффектов испытательной среды:

$$\Delta\tilde{V}_j = \sum_{i=1}^S v_i \sin\left(i\pi\tilde{t}_j^{(-)}\right) \approx -\frac{1}{\gamma_1} \int_0^{\tilde{t}_j^{(-)}} \varepsilon(t) dt. \quad (13)$$

Погрешность оценки INL для j -го кода АЦП по второй гистограмме $\Delta\tilde{NL}_j^{(-)}$ равна:

$$\Delta\tilde{NL}_j^{(-)} = \frac{\Delta\tilde{V}_j}{h_H} = -\frac{1}{\gamma_1 \times h_H} \int_0^{\tilde{t}_j^{(-)}} \varepsilon(t) dt, \quad (14)$$

где $h_H = A_v / N - 2$ – номинальный интервал квантования АЦП.

Максимальную вариацию основной погрешности $\varepsilon(t)$ можно представить в виде:

$$\Delta\gamma = \max[\varepsilon(t)] - \min[\varepsilon(t)]. \quad (15)$$

Так как по методу связанных гистограмм исходный ИС вначале формируют таким образом, чтобы нижняя граница ИС соответствовала нижнему напряжению АЦП U_H , а верхняя граница ИС соответствовала верхнему напряжению АЦП U_B , то погрешность оценки нижнего и верхнего напряжения кодового перехода АЦП равна нулю.

Поэтому максимальная погрешность оценки $\Delta\tilde{INL}_j^{(-)}$ с учетом $\Delta\gamma = \max[\varepsilon(t)]$ будет равна:

$$\max|\Delta\tilde{INL}_j^{(-)}| = \frac{\Delta\gamma}{\gamma_1 \times h_H}. \quad (16)$$

Если оценить влияние $\varepsilon(t)$ на точность оценки INL по третьей гистограмме, то получим:

$$\Delta\tilde{INL}_j^{(+)} = \frac{\Delta\tilde{V}_j}{h_H} = \frac{1}{\gamma_2 \times h_H} \int_0^{\tilde{t}_j^{(+)}} \varepsilon(t) dt. \quad (17)$$

Выражения (14) и (17) при $\gamma_1 = \gamma_2$ равны, за исключением знака.

Поэтому для обеспечения точности измерения INL АЦП на уровне 1 младшего значащего разряда при сдвиге опорного уровня исходного ИС вниз или вверх величина максимального дрейфа опорного уровня ИС не должна превышать произведения напряжения смещения ИС и номинального интервала квантования АЦП.

Кроме того, можно уменьшить ошибку $\hat{\Delta}$, возникающую из-за непостоянного во времени смещения ИС, минимум в 2 раза, а в случае симметричного дрейфа опорного уровня ИС при смещении ИС вниз и вверх ее полностью устранить, если при объединении функций INL усреднять их общую часть.

Заключение

В работе получены зависимости, показывающие, что для обеспечения точности измерения INL АЦП по методу связанных гистограмм на уровне 1 младшего значащего разряда при смещении ИС вниз или вверх, величина максимального дрейфа опорного уровня ИС не должна превышать произведения напряжения смещения ИС и номинального интервала квантования ЦИМ. При внедрении метода связанных гистограмм и аналогичных методов в производственные испытания АЦП в будущем парадигма разработки испытательного оборудования может перейти от разработки линейных источников ИС к разработке источников с высокой скоростью нарастания ИС и низким температурным дрейфом.

Библиографический список

1. International Technology Roadmap for Semiconductors, 2015.
2. **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.
3. Патент № 2828783 РФ, МПК H03M 1/10. Способ определения интегральной и дифференциальной нелинейностей АЦП и устройство для его осуществления / А.М. Абрамов; Рязанский государственный радиотехнический университет. заявл. 07.02.2024; опубл. 18.10.2024, Бюл. № 29. 22 с.
4. **Абрамов А.М.** Анализ эффективности метода метрологического испытания при вычислении интегральной нелинейности АЦП // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 90. С. 133-142.
5. **Абрамов А.М.** Учет нелинейной составляющей измерительного сигнала по связанным гистограммам при метрологических испытаниях АЦП // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 88. С. 95-105.
6. **Чирухин В.А.** Применение метода наименьших квадратов для аппроксимации периодических процессов при построении прогнозов // Записки Горного института. 2014. Т. 208. С. 197.

UDC 621.317.1: 621.3.087.92

INFLUENCE OF NON-STATIONARY EFFECTS OF TEST ENVIRONMENT ON THE ACCURACY OF RELATED HISTOGRAM METHOD FOR ADC METROLOGICAL TESTS

A. M. Abramov, Ph.D. (Tech.), Associate Professor, Department of IIBMT, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0009-0006-7274-5206, e-mail: abramov.a.job@yandex.ru

*The problem of determining the requirements to metrological test system hardware by method of coupled histograms to ensure the accuracy of measuring integral nonlinearity (INL) of ADC at the level of 1LSB (least significant bit) is considered. **The aim of the paper** is to evaluate the accuracy of coupled histogram method under non-stationary effects of test environment. Dependences for method of coupled histograms are found, showing that the error in determining INL of ADC when measuring signal (MS) is shifted up or down is determined by the ratio of maximum drift of MS reference level to the product of MS offset voltage by nominal quantization interval of ADC. The method of reducing the influence of non-stationary effects of test environment on the accuracy of coupled histograms method is proposed, which consists in combining INL functions obtained by shifting reference level of original MS downward and upward, and averaging their common part.*

Keywords: non-stationary effects, metrological test system, analog-to-digital converter, measuring signal, integral nonlinearity, estimation error, histogram, code transition time, digital-to-analog converter.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-91-249-255

References

1. *International Technology Roadmap for Semiconductors*, 2015.
2. **Abramov A.M., Kaplan M.B., Nikitin S.V. i dr.** Metody i sredstva avtomatizacii izmerenij i ispytaniy slozhnyh ob#ektov. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2017, no. 60, pp. 172-182. (in Russian).
3. *Patent № 2828783 RF*, MPK H03M 1/10. Sposob opredelenija integral'noj i differencial'noj nelinejnostej ACP i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija. A.M. Abramov; Rjazanskij gosudarstvennyj radio-tehnicheskij universitet, zajavl. 07.02.2024; opubl. 18.10.2024, Bjul, no. 29. 22 p.
4. **Abramov A.M.** Analiz jeffektivnosti metoda metrologicheskogo ispytaniya, uchityvajushhego nelinejnuju sostavljajushhuju izmeritel'nogo signala pri vychislenii integral'noj nelinejnosti ACP. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2024, no. 90, pp. 133-142. (in Russian).
5. **Abramov A.M.** Uchet nelinejnoj sostavljajushhej izmeritel'nogo signala po svjazannym gistogram-mam pri metrologicheskikh ispytaniyah ACP. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2024, no. 88, pp. 95-105. (in Russian).
6. **Chiruhin V.A.** Primenenie metoda naimen'shikh kvadratov dlja approksimacii periodicheskikh pro-cessov pri postroenii prognozov. *Zapiski Gornogo instituta*. 2014, vol. 208, 197 p. (in Russian).