УДК 535.24:621.3.087.92

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ИСПЫТАНИЕ ЦИФРОВЫХ ДАТЧИКОВ ОСВЕЩЕННОСТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА СКОЛЬЗЯЩЕЙ ГИСТОГРАММЫ

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 метрологического испытания датчиков освещённости со встроенным аналого-цифровым преобразователем (ДОАЦП). ***Целью работы является*** *адаптация метода скользящей гистограммы для испытаний ДОАЦП, позволяющая снизить требования к точности меры светового воздействия за счёт использования прецизионных методик. Предложена структурная схема устройства, реализующего метрологическое испытание ДОАЦП на основе метода скользящей гистограммы. Важной особенностью нового метода является использование двух источников светового воздействия для формирования стабильной и управляемой результирующей освещённости на чувствительном элементе ДОАЦП. Описан алгоритм снятия локальных гистограмм при смещении формируемой освещённости по всему рабочему диапазону ДОАЦП. Показано, как по построенной общей гистограмме вычисляются дифференциальная (DNL) и интегральная (INL) нелинейности ДОАЦП. Погрешность от нелинейности в новом методе возникает только в том случае, когда имеются совместные нелинейность формируемой освещенности и погрешность смещения уровня ее постоянной составляющей.*

Ключевые слова: *метод скользящей гистограммы, прецизионная методика, датчик освещенности, аналого-цифровой преобразователь, интервал квантования, общая гистограмма, дифференциальная нелинейность, интегральная нелинейность, функция преобразования.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2026-97-297-302

Введение

В современной элементной базе представлен широкий класс интегрированных измерительных устройств с цифровым выходом – датчики освещённости, Холла, давления, абсолютные энкодеры и др. Такие устройства содержат в своем составе АЦП и формируют выходной сигнал в цифровой форме, что позволяет непосредственно сопрягать их с цифровыми системами обработки данных.

Однако метрологическое испытание и аттестация подобных устройств сопряжены с рядом трудностей. В отличие от испытаний автономных АЦП, где входным сигналом является напряжение заданной формы, для таких датчиков входное воздействие имеет неэлектрическую природу. Воспроизведение физической величины (освещённости, магнитного поля, давления и т.д.) с высокой точностью требует применения дорогостоящего эталонного оборудования.

В работах [1-4] авторы предлагают новые подходы к метрологическому испытанию АЦП, позволяющие снизить требования к эталонным средствам измерений по классу точности за счет использования прецизионных методик. Под прецизионной методикой понимается совокупность действий над инструментальными средствами, направленных на преодоление метрологических ограничений средств испытаний и измерений.

В частности, в патенте [4] предлагается метод метрологического испытания АЦП, названный методом скользящей гистограммы, который основан на многократном смещении малого по амплитуде измерительного сигнала (ИС) по всему динамическому диапазону испытываемого АЦП. Благодаря тому, что шаг смещения ИС соизмерим с интервалом квантования испытываемого АЦП, в испытании каждого интервала квантования участвуют все

участки ИС, имеющие различный наклон. Данная особенность обеспечивает высокую точность при определении реальной функции преобразования (ФП) АЦП.

Метод скользящей гистограммы может быть распространен на метрологическое испытание интегрированных измерительных устройств с цифровым выходом. В данной работе такая адаптация выполнена на примере ДОАЦП, что позволяет снизить требования к точности меры светового воздействия. Предложенный метод защищён патентом РФ № 2859723 [5].

Теоретическая часть

Для пояснения сути предлагаемого подхода на рисунке 1 представлена структурная схема устройства, реализующего метрологическое испытание ДОАЦП на основе метода скользящей гистограммы.

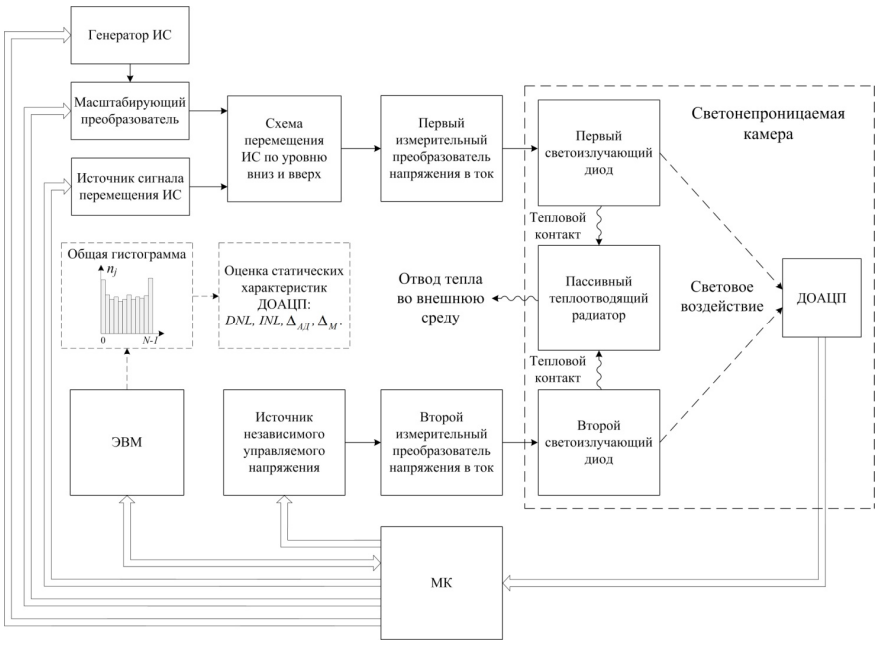


Рисунок 1 – Структурная схема устройства для метрологического испытания ДОАЦП
Figure 1 – Structural diagram of DOADC metrological testing device

В состав устройства входят генератор ИС, масштабирующий преобразователь, источник сигнала перемещения ИС, схема перемещения ИС по уровню вниз и вверх, источник независимого управляемого напряжения (ИУН), первый и второй измерительные преобразователи напряжения в ток (ИП1 и ИП2 соответственно), первый и второй светоизлучающие диоды (СД1 и СД2 соответственно), пассивный теплоотводящий радиатор (ПТР), светонепроницаемая камера (СК), микроконтроллер (МК) и ЭВМ.

Устройство работает следующим образом. Периодический ИС треугольной формы с выхода генератора ИС ослабляют для уменьшения его шума квантования. Затем ослабленный измерительный сигнал (ОИС) суммируют с сигналом перемещения и преобразуют в ток. Этот ток подают на СД1 для формирования светового ИС, обеспечивающего на чувствительном элементе ДОАЦП заданную освещенность с амплитудой E_0. При исключении внешней засветки освещенность от СД1 изменяется по закону, близкому к треугольному, на фоне постоянной составляющей освещенности. Постоянная составляющая освещенности формируется в два этапа. Сначала она создаётся только излучением СД1, а затем суммарным излучением СД1 и СД2. Кроме того, СД1 и СД2 установлены на ПТР, что позволяет формировать в СК стабильную и управляемую результирующую освещенность на чувствительном элементе ДОАЦП. Уровень постоянной составляющей освещенности (C) смещают по всему рабочему диапазону ДОАЦП (рисунок 2) с шагом, номинальное значение которого близко к интервалу квантования по освещенности ДОАЦП. На каждом шаге смещения накапливают локальную гистограмму цифровых кодов ДОАЦП в диапазоне значений формируемой осве-

щенности. Для этого МК фиксирует выходные коды ДОАЦП и передаёт их на ЭВМ, где суммируется число кодов, соответствующих каждому интервалу квантования по освещенности в общей гистограмме. Далее ЭВМ по общей гистограмме определяет действительные абсолютные значения интервалов квантования по освещенности, с помощью которых вычисляет DNL и INL ДОАЦП. Затем строит реальную ФП ДОАЦП и по ней определяет аддитивную ($\Delta_{АД}$) и мультипликативную (Δ_M) погрешности по освещенности в сравнении с номинальной ФП.

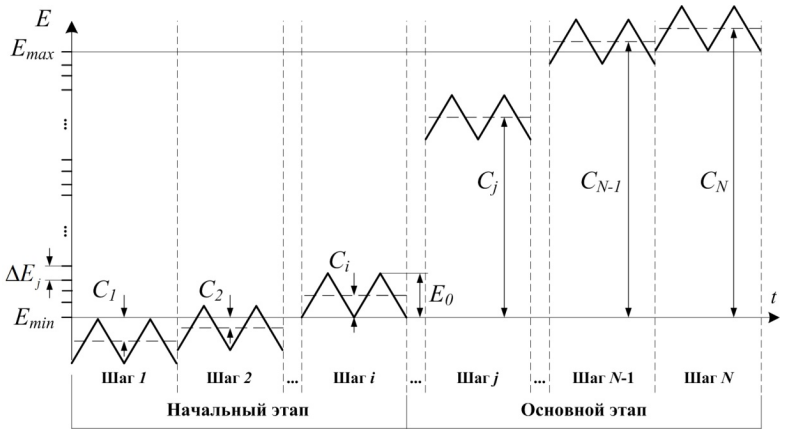


Рисунок 2 – Смещение формируемой освещённости по рабочему диапазону ДОАЦП
Figure 2 – Shift of the generated illumination over DOADC operating range

Для снятия локальных гистограмм выполняется следующая последовательность действий.

1. Выделяются границы испытываемого ДОАЦП: $E_{\min}$ – нижняя граница рабочего диапазона ДОАЦП, соответствующая минимальному напряжению кодового перехода встроенного АЦП, $E_{\max}$ – верхняя граница рабочего диапазона ДОАЦП, соответствующая максимальному напряжению кодового перехода встроенного АЦП.

2. ИС (напряжение треугольной формы) ослабляют для уменьшения его шума квантования с коэффициентом ослабления *L*, определяемым как:

$$L \geq \frac{\Delta E_{Г}}{\Delta E_{АЦП}} \times k_{ТР},$$

где $\Delta E_{Г}$ – минимальный шаг изменения формируемой освещенности на чувствительном элементе испытываемого ДОАЦП без учета ослабления ИС; $\Delta E_{АЦП}$ – ожидаемое значение шага квантования по освещенности испытываемого ДОАЦП; $k_{ТР}$ – требуемое превышение точности способа над точностью испытываемого ДОАЦП.

3. Ослабленный ИС суммируют с сигналом перемещения, то есть опорным напряжением, и преобразуют в ток, который используют для формирования светового ИС, обеспечивающего на чувствительном элементе испытываемого ДОАЦП заданную освещенность $E(t)$, изменяющуюся по закону, близкому к треугольному:

$$E(t) = \begin{Bmatrix} \left|Q'^{(+)}\right| t - 2E_0 \times (i-1), & T(i-1) < t \leq T\left(i - \frac{1}{2}\right) \\ -\left|Q'^{(-)}\right| t + 2E_0 \times i, & T\left(i - \frac{1}{2}\right) < t \leq T \cdot i \end{Bmatrix},$$

где $Q'^{(+)}$ и $Q'^{(-)}$ – производные на возрастающем и убывающем участках формируемой освещенности; E_0 – амплитуда переменной составляющей освещенности от СД1; T – период изменения освещенности; i – порядковый номер цикла изменения освещенности.

Минимальный шаг изменения формируемой освещенности с учетом ослабления ИС ΔE_{Γ}^{*} определяется как:

$$\Delta E_{\Gamma}^{*} = \frac{h_{\Gamma} \times k_{U/I} \times k_{I/E}}{L},$$

где h_{Γ} – номинальное значение шага квантования источника ИС; $k_{U/I}$ – коэффициент преобразования напряжения в ток; $k_{I/E}$ – коэффициент преобразования тока в освещенность.

Заданная освещенность $E(t)$ формируется на чувствительном элементе испытываемого ДОАЦП на фоне постоянной составляющей освещенности, создаваемой постоянной составляющей тока СД1, при исключении внешней световой засветки.

4. На начальном этапе испытаний с помощью сигнала перемещения смещают уровень постоянной составляющей освещенности таким образом, чтобы максимальное значение формируемой освещенности было равно нижней границе рабочего диапазона ДОАЦП $E_{\min}$ (шаг 1). Проводят испытания ДОАЦП, фиксируя и накапливая его цифровые коды, соответствующие значениям формируемой освещенности в диапазоне $E_{\min} - E_0 + E(t)$ (в этом случае фиктивные).

5. Затем смещают уровень постоянной составляющей освещенности $E_{\min} - E_0/2$ на номинальное значение ΔE_H (шаг 2), близкое к интервалу квантования по освещенности испытываемого ДОАЦП, изменяя сигнал перемещения:

$$\Delta E_H = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2^K - 2}.$$

Проводят испытания, накапливая цифровые коды, соответствующие значениям формируемой освещенности в диапазоне $E_{\min} - E_0 + E(t) + \Delta E_H$, за исключением граничных значений. Снова смещают уровень постоянной составляющей освещенности $E_{\min} - E_0/2 + \Delta E_H$ на значение ΔE_H, изменяя сигнал перемещения. Накапливают цифровые коды в диапазоне $E_{\min} - E_0 + E(t) + 2\Delta E_H$, за исключением граничных значений, суммируя их с накопленными цифровыми кодами в предыдущих испытаниях.

6. Продолжают смещение формируемой освещенности с шагом ΔE_H, проводя испытания и накопление цифровых кодов до тех пор, пока ее значения не окажутся в диапазоне $E_{\min} + E(t)$ (шаг i). С этого момента завершается начальный этап и начинается основной.

7. Формируемую освещенность $E_{\min} + E(t)$ теперь смещают на ΔE_H только с помощью источника независимого напряжения и СД2. Накапливают цифровые коды в диапазоне $E_{\min} + E(t) + \Delta E_H$, за исключением граничных значений. Потом проводят испытания в диапазонах $E_{\min} + E(t) + 2\Delta E_H$, $E_{\min} + E(t) + 3\Delta E_H$, …, $C_j/2 + E(t)$ (шаг j) и т.д. до тех пор, пока минимальное значение результирующей освещенности не превысит верхнюю границу рабочего диапазона ДОАЦП $E_{\max}$ (шаг N). На этом испытания заканчиваются.

Накопив гистограмму распределения цифровых кодов испытываемого ДОАЦП, можно вычислить действительное абсолютное значение любого интервала квантования по освещенности:

$$\Delta E_j = \frac{(E_{\max} - E_{\min})}{M} n_j,$$

где M – общее число отсчетов испытываемого ДОАЦП в общей гистограмме, за исключением отсчетов с граничных значений освещенности; n_j – количество цифровых кодов, соответствующих *j*-му интервалу квантования по освещенности испытываемого ДОАЦП.

По вычисленным значениям можно:

– найти среднее значение кванта по освещенности (ΔE_{CP}) испытываемого ДОАЦП как:

$$\Delta E_{CP} = \frac{1}{2^K - 2} \sum_{j=1}^{2^K-2} \Delta E_j ,$$

где K – разрядность испытываемого ДОАЦП;

– вычислить мгновенные значения дифференциальной ($\Delta_{ДИФ.j}$) и интегральной нелинейностей ($\Delta_{ИНТ.j}$) каждого кванта по освещенности испытываемого ДОАЦП как:

$$\Delta_{ДИФ.j} = \Delta E_j - \Delta E_{CP},$$

$$\Delta_{ИНТ.j} = \sum_{i=1}^{j-2} \Delta E_i - j\Delta E_{CP},$$

где $0 \le j \le 2^K$;

– построить зависимости ΔE_j, $\Delta_{ДИФ.j}$, $\Delta_{ИНТ.j}$ от текущего цифрового кода D_j испытываемого ДОАЦП и по ним определить предельные значения, средние значения, среднеквадратические отклонения DNL и INL, построить реальную ФП испытываемого ДОАЦП и по ней найти аддитивную $\Delta_{АД}$ и мультипликативную Δ_M погрешность в сравнении с номинальной ФП.

Нелинейность формируемой освещенности для рассматриваемого способа практически не влияет на точность измерения ФП испытываемого ДОАЦП, поскольку на основном этапе испытаний каждый участок стабильной по форме освещенности с различным наклоном участвует в испытании каждого интервала квантования по освещенности испытываемого ДОАЦП.

Погрешность от нелинейности в данном способе возникает только в том случае, когда имеется совместная нелинейность формируемой освещенности и погрешность смещения уровня ее постоянной составляющей. Детальный анализ показал, что погрешность в определении интервалов квантования по освещенности испытываемого ДОАЦП определяется произведением нелинейности формируемой освещенности и интегральной нелинейности смещения уровня ее постоянной составляющей и имеет второй порядок малости.

Таким образом, предложенный способ позволяет производить метрологическое испытание и аттестацию статических характеристик ДОАЦП путем перехода от прецизионных средств измерений к прецизионным методикам, при которых требования к образцовым средствам могут быть существенно снижены.

Заключение

В работе выполнена адаптация метода скользящей гистограммы для метрологического испытания ДОАЦП. Показано, что предложенный подход позволяет снизить требования к точности меры светового воздействия за счет использования прецизионных методик. Важной особенностью нового метода является использование двух источников светового воздействия для формирования стабильной и управляемой результирующей освещённости на чувствительном элементе ДОАЦП.

Библиографический список

1. **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.

2. **Абрамов А.М.** Анализ эффективности метода метрологического испытания при вычислении интегральной нелинейности АЦП // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 90. С. 133-142.

3. **Абрамов А.М**. Аппаратно-программная реализация и экспериментальное исследование метода связанных гистограмм при испытаниях канала аналогового ввода и преобразования платы сбора данных NI PCIe-6321 / А.М. Абрамов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 92. С. 226-239.

4. Патент № 2337475 РФ, МПК H03M 1/10 Способ метрологического испытания и аттестации статических характеристик АЦП и устройство для его осуществления / Е.М. Прошин, С.Г. Гуржин, А.М. Абрамов; Рязанский государственный радиотехнический университет, заявл. 22.05.2007; опубл. 27.10.2008. Бюл. № 30. 12 с.

5. Патент № 2859723 C1 РФ, МПК G01R 31/26, G01J 1/10, G01J 1/28. Способ метрологического испытания и аттестации статических характеристик датчиков освещенности с встроенным АЦП и устройство для его осуществления / А.М. Абрамов; Рязанский государственный радиотехнический университет, заявл. 07.11.2025; опубл. 07.04.2026. Бюл. № 10. 17 с.

UDC 535.24:621.3.087.92

METROLOGICAL TESTING OF ILLUMINANCE DIGITAL SENSORS WITH BUILT-IN ADC BASED ON SLIDING HISTOGRAM METHOD

A. M. Abramov, Ph.D. (in technical sciences), Associate Professor, Department of Information-measurement and Biomedical Technology, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0009-0006-7274-5206, e-mail: abramov.a.job@yandex.ru

The problem of metrological testing of illuminance sensors with built-in analog-to-digital converter (ISADC) is considered. The aim of this work is to adapt the sliding histogram method for ISADC testing, which makes it possible to reduce the requirements for the accuracy of light exposure measure through the use of precision techniques. A structural diagram of a device implementing metrological testing of ISADC based on a sliding histogram method is proposed. An important feature of a new method is the use of two light sources to generate stable and controlled resultant illuminance on the sensing element of the sensor. An algorithm for acquiring local histograms while shifting generated illuminance across entire operating range of the sensor is described. The author shows how differential (DNL) and integral (INL) nonlinearities of the sensor are calculated from the constructed overall histogram. The nonlinearity error in a new method occurs only in case of combined nonlinearity of generated illuminance and error in its constant component level shift.

Keywords: *sliding histogram method, precision technique, illuminance sensor, built-in ADC, quantization interval, overall histogram, differential nonlinearity (DNL), integral nonlinearity (INL), transfer function.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2026-97-297-302

References

1. **Abramov A.M.** Uchet nelinejnoj sostavljajushhej izmeritel'nogo signala po svjazannym gistogrammam pri metrologicheskih ispytanijah ACP. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta*. 2024, no. 88, pp. 95-105. (in Russian).

2. **Abramov A.M.** Analiz jeffektivnosti metoda metrologicheskogo ispytanija pri vychislenii integral'noj nelinejnosti ACP. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta*. 2024, no. 90, pp. 133-142. (in Russian).

3. **Abramov A.M.** Apparatno-programmnaja realizacija i jeksperimental'noe issledovanie metoda svjazannyh gistogramm pri ispytanijah kanala analogovogo vvoda i preobrazovanija platy sbora dannyh NI PSIe-6321. A.M. Abramov. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta*. 2025, no. 92, pp. 226-239. (in Russian).

4. *Patent* № 2337475 RF, MPK H03M 1/10 Sposob metrologicheskogo ispytanija i attestacii staticheskih harakteristik ACP i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija. E.M. Proshin, S.G. Gurzhin, A.M. Abramov; *Rjazanskij gosudarstvennyj radiotehnicheskij universitet*. zajavl. 22.05.2007; opubl. 27.10.2008. Bjull., no. 30, 12 p. (in Russian).

5. *Patent* № 2859723 C1 *RF*, MPK G01R 31/26, G01J 1/10, G01J 1/28 Sposob metrologicheskogo ispytanija i attestacii staticheskih harakteristik datchikov osveshhennosti s vstroennym ACP i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija. A.M. Abramov. *Rjazanskij gosudarstvennyj radiotehnicheskij universitet*. zajavl. 07.11.2025; opubl. 07.04.2026. Bjull., no. 10, 17 p. (in Russian).