УДК 535.24:621.3.087.92

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ИСПЫТАНИЕ АБСОЛЮТНЫХ ЭНКОДЕРОВ 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 абсолютных энкодеров (АЭ). ***Целью работы является*** *адаптация метода скользящей гистограммы для испытаний АЭ, позволяющая снизить требования к точности меры механического углового воздействия за счет использования прецизионных методик. Предложена структурная схема устройства, реализующего метрологическое испытание АЭ на основе метода скользящей гистограммы. Важной особенностью нового метода является формирование результирующего углового воздействия на входном валу АЭ путем суммирования независимо формируемых переменной и постоянной угловых составляющих, шаг которых механически редуцирован. Описан алгоритм снятия локальных гистограмм при смещении постоянной угловой составляющей с шагом, близким к ожидаемому значению углового шага АЭ, до полного оборота его входного вала. Показано, как по построенной общей гистограмме вычисляются дифференциальная (DNL) и интегральная (INL) нелинейности АЭ. Погрешность от нелинейности в новом методе возникает только в том случае, когда имеются совместные нелинейность переменной угловой составляющей и погрешность шага смещения постоянной угловой составляющей.*

Ключевые слова: *метод скользящей гистограммы, прецизионная методика, абсолютный энкодер, редукция, интервал квантования, общая гистограмма, дифференциальная нелинейность, интегральная нелинейность, функция преобразования.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2026-97-303-308

Введение

Интегрированные измерительные устройства с цифровым выходом находят широкое применение в современных информационно-измерительных системах. К ним относятся АЭ, датчики Холла, освещённости, давления и др. Встроенный АЦП в эти устройства позволяет подключать их непосредственно к цифровым системам обработки данных.

Основная сложность при метрологической аттестации интегрированных измерительных устройств с цифровым выходом связана с неэлектрической природой их входного сигнала. Высокоточное воспроизведение физической величины (угла поворота, магнитного поля, освещённости, давления) требует дорогостоящего эталонного оборудования. В случае АЭ с цифровым выходом это высокоточные угломерные установки: автоколлиматоры, прецизионные поворотные столы.

Авторы работ [1-4] разработали новые подходы к метрологическому испытанию АЦП, которые применимы к интегрированным измерительным устройствам с цифровым выходом при соответствующей адаптации. Преимуществом этих подходов является снижение требований к точности эталонных средств измерений путём применения прецизионных методик. Прецизионная методика представляет собой последовательность операций с инструментальными средствами, позволяющую обойти метрологические ограничения испытательного оборудования.

Одним из подходов [4] является метод скользящей гистограммы. Этот метод основан на многократном смещении малого по амплитуде измерительного сигнала (ИС) по всему динамическому диапазону испытываемого АЦП. При этом шаг смещения ИС соизмерим с интервалом квантования испытываемого АЦП. Благодаря этому в испытании каждого интервала квантования АЦП участвуют все участки ИС, имеющие различный наклон. Данная особен-

ность делает метод скользящей гистограммы независимым от нелинейности ИС при определении реальной функции преобразования (ФП) АЦП.

В данной работе выполнена адаптация метода скользящей гистограммы для испытаний АЭ, что позволяет снизить требования к точности меры механического углового воздействия. На предложенный метод получено положительное решение о выдаче патента РФ.

Теоретическая часть

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

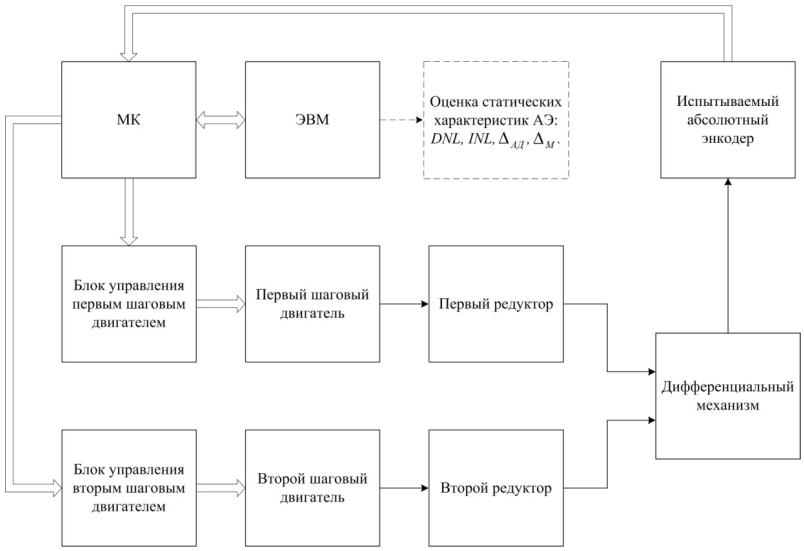


Рисунок 1 – Структурная схема устройства для метрологического испытания АЭ
Figure 1 – Structural diagram of the device for AE metrological testing

В состав устройства входят первый и второй шаговые двигатели (ШД1 и ШД2), блоки управления ШД1 и ШД2, первый и второй редукторы (РД1 и РД2), дифференциальный механизм, микроконтроллер (МК) и ЭВМ.

Устройство работает следующим образом. Формируют результирующее угловое воздействие на входном валу АЭ путем суммирования независимо формируемых переменной и постоянной угловых составляющих, шаг которых механически редуцирован.

Для формирования переменной составляющей МК через блок управления ШД1 подает управляющий сигнал на ШД1. Кинематическая связь ШД1 с первым входным валом дифференциального механизма через РД1 повышает разрешающую способность системы формирования переменной угловой составляющей относительно разрешающей способности испытываемого АЭ. Механическую постоянную угловую составляющую формируют путем подачи с МК через блок управления ШД2 управляющего сигнала на ШД2. Созданное вращение выходного вала ШД2 передают через РД2 на второй входной вал дифференциального механизма. Дифференциальный механизм осуществляет суммирование переменной и постоянной угловых составляющих. Результирующее угловое воздействие с его выходного вала подают на входной вал АЭ.

Переменная угловая составляющая обладает стабильной формой и амплитудой, а также изменяется по закону, близкому к треугольному, на фоне постоянной угловой составляющей. При этом постоянную угловую составляющую смещают с дискретным шагом $\Delta\theta_H$ (рисунок 2), номинальное значение которого близко к ожидаемому значению углового шага АЭ, до полного оборота его входного вала. Смещение начинают с произвольно выбранного начального углового положения, которое принимают за начальный угол поворота. Начиная с этого угла, на каждом шаге накапливают локальную гистограмму цифровых кодов в диапа-

зоне, определяемом амплитудой переменной угловой составляющей θ_0. Для этого МК фиксирует выходные коды АЭ и передаёт их на ЭВМ. Смещение постоянной угловой составляющей производят до тех пор, пока разница между локальными гистограммами на начальном и текущем углах поворота вала АЭ не станет меньше заданного порога. Далее ЭВМ суммирует число кодов, соответствующих каждому интервалу квантования по углу поворота АЭ в общей гистограмме. Затем по общей гистограмме вычисляются статические характеристики испытываемого АЭ.

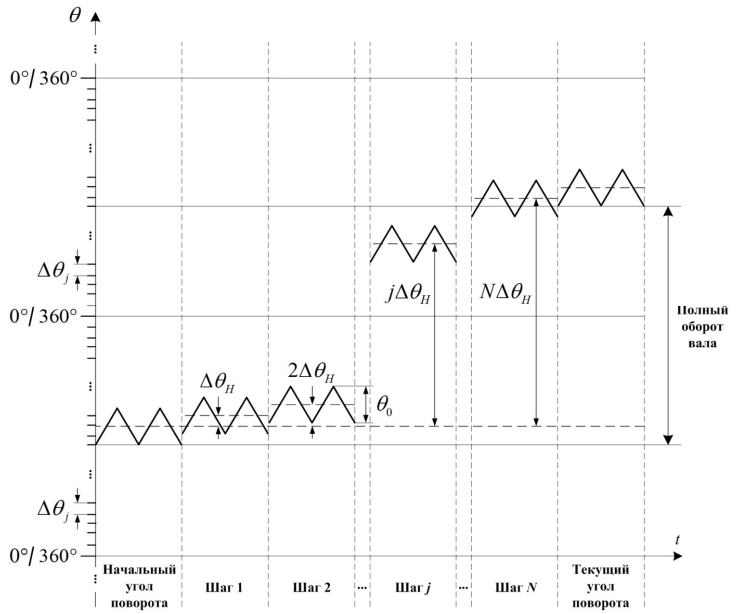


Рисунок 2 – Смещение результирующего углового воздействия на входном валу АЭ
Figure 2 – Shift of the resulting angular action on AE input shaft

Для снятия локальных гистограмм выполняется следующая последовательность действий:

1. Минимальный угловой шаг механической переменной составляющей на входном валу АЭ уменьшают с коэффициентом L, определяемым как

$$L \geq \frac{h_Г}{\Delta\theta_{АЭ}} \times k_{ТР},$$

где $h_Г$ – номинальное значение шага формируемой переменной угловой составляющей; $\Delta\theta_{АЭ}$ – номинальное значение углового шага испытываемого АЭ; $k_{ТР}$ – требуемое превышение точности способа над точностью испытываемого АЭ.

Это позволяет повысить разрешающую способность системы формирования механической переменной составляющей в $k_{ТР}$ раз относительно разрешающей способности испытываемого АЭ.

2. Механическую переменную составляющую с уменьшенным угловым шагом суммируют с механической постоянной составляющей. Полученное суммарное воздействие подают на входной вал АЭ. Таким образом, создают результирующее угловое воздействие, в котором переменная угловая составляющая изменяется по закону $\theta(t)$, близкому к треугольному, на фоне постоянной угловой составляющей, согласно выражению:

$$\theta(t) = \begin{Bmatrix} \left|Q'^{(+)}\right| t - 2\theta_0 \times (i-1), & T(i-1) < t \leq T\left(i - \frac{1}{2}\right) \\ -\left|Q'^{(-)}\right| t + 2\theta_0 \times i, & T\left(i - \frac{1}{2}\right) < t \leq T \cdot i \end{Bmatrix},$$

где $Q'^{(+)}$ и $Q'^{(-)}$ – производная на возрастающем и убывающем участках формируемой переменной угловой составляющей; θ_0 – амплитуда переменной угловой составляющей; T – период изменения переменной угловой составляющей; i – порядковый номер цикла изменения переменной угловой составляющей.

Минимальный угловой шаг переменной составляющей $\Delta\theta_Г$ определяется как:

$$\Delta\theta_Г = \frac{h_Г}{L}.$$

Для обеспечения превышения точности способа над точностью испытываемого АЭ не менее чем в 5 раз минимальный угловой шаг переменной составляющей $\Delta\theta_Г$ выбирают в 5 раз меньше номинального значения углового шага испытываемого АЭ $\Delta\theta_{АЭ}$.

3. Фиксируют и накапливают цифровые коды с выхода АЭ при результирующем угловом воздействии на его входной вал. При этом начинают с произвольно выбранного начального углового положения, которое принимают за начальный угол поворота. Накопление производят в диапазоне, определяемом амплитудой переменной угловой составляющей θ_0, за исключением её граничных значений, формируя первую локальную гистограмму цифровых кодов.

Далее под рабочим диапазоном понимается диапазон, определяемый амплитудой переменной угловой составляющей, за исключением её граничных значений.

4. Смещают постоянную угловую составляющую на номинальное значение $\Delta\theta_Н$ (шаг 1), близкое к ожидаемому значению углового шага испытываемого АЭ:

$$\Delta\theta_Н = \frac{360°}{2^K},$$

где K – разрядность испытываемого АЭ.

5. На шаге 1 фиксируют и накапливают цифровые коды с выхода АЭ в рабочем диапазоне, формируя локальную гистограмму цифровых кодов для данного шага.

6. Снова смещают постоянную угловую составляющую на номинальное значение $\Delta\theta_Н$ (шаг 2) и накапливают цифровые коды с выхода АЭ в рабочем диапазоне, формируя соответствующую локальную гистограмму цифровых кодов.

7. Продолжают смещение постоянной угловой составляющей на номинальное значение $\Delta\theta_Н$. На каждом шаге накапливают цифровые коды с выхода АЭ в рабочем диапазоне, формируя локальные гистограммы. Процесс продолжают до тех пор, пока мера различия между локальными гистограммами, накопленными на начальном и текущем углах поворота входного вала АЭ, не станет меньше заданного порога. После этого испытания заканчиваются, а локальную гистограмму цифровых кодов на текущем угле поворота не учитывают для исключения двойного учета выходных кодов испытываемого АЭ при циклическом сканировании угла поворота его входного вала.

Мерой различия служит норма вектора разности относительных частот соответствующих цифровых кодов в сравниваемых локальных гистограммах. Под относительной частотой цифрового кода в локальной гистограмме понимается отношение количества его появлений к общему количеству зафиксированных кодов в этой локальной гистограмме. Например, в качестве такой меры может использоваться максимальное абсолютное отклонение относительных частот.

Построив общую гистограмму распределения цифровых кодов испытываемого АЭ, можно вычислить действительное абсолютное значение любого интервала квантования по углу поворота:

$$\Delta\theta_j = \frac{360°}{M} n_j,$$

где M – общее число отсчетов испытываемого АЭ в общей гистограмме, за исключением отсчетов, соответствующих границам амплитуды переменной угловой составляющей;

n_j – количество цифровых кодов, соответствующих j-му интервалу квантования по углу поворота испытываемого АЭ.

По вычисленным значениям можно:

– найти среднее значение кванта по углу поворота $\Delta\theta_{CP}$ испытываемого АЭ как:

$$\Delta\theta_{CP} = \frac{1}{2^K}\sum_{j=1}^{2^K}\Delta\theta_j \ ;$$

– вычислить значения дифференциальной ($\Delta_{ДИФ.j}$) и интегральной ($\Delta_{ИНТ.j}$) нелинейности для каждого интервала квантования по углу поворота испытываемого АЭ, обусловленные погрешностями изготовления, сборки и юстировки компонентов энкодера, по формулам:

$$\Delta_{ДИФ.j} = \Delta\theta_j - \Delta\theta_{CP},$$

$$\Delta_{ИНТ.j} = \sum_{i=1}^{j-1}\Delta\theta_i - j\Delta\theta_{CP} \ ,$$

где $0 \le j \le 2^K$;

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

Нелинейность углового воздействия для рассматриваемого способа практически не влияет на точность измерения ФП испытываемого АЭ, поскольку в испытании каждого его интервала квантования участвуют все участки стабильной по форме переменной угловой составляющей, имеющие различный наклон.

Погрешность от нелинейности в данном способе возникает только в том случае, когда имеются совместная нелинейность переменной угловой составляющей и погрешность шага смещения постоянной угловой составляющей. Детальный анализ показал, что погрешность в определении интервалов квантования по углу поворота испытываемого АЭ определяется произведением нелинейности переменной угловой составляющей и погрешности шага смещения постоянной угловой составляющей и имеет второй порядок малости.

Таким образом, предложенный способ позволяет производить метрологическое испытание и аттестацию статических характеристик АЭ 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 АЭ. Показано, что предложенный подход позволяет снизить требования к точности меры механического углового воздействия за счет использования прецизионных методик. Важной особенностью нового метода является формирование результирующего углового воздействия на входном валу АЭ путем суммирования независимо формируемых переменной и постоянной угловых составляющих, шаг которых механически редуцирован. На предложенный способ получено положительное решение о выдаче патента РФ. Метод скользящей гистограммы может быть распространен на другие типы интегрированных измерительных устройств с цифровым выходом.

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, бюлл. № 30, 12 с.

UDC 531.7:621.3.087.92

METROLOGICAL TESTING OF ABSOLUTE ENCODERS BASED ON SLIDING HISTOGRAM METHOD

A. M. Abramov, Ph.D. (in technical sciences), Associate Professor, Department of 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 absolute encoders (AE) is considered. The aim of this work is to adapt a sliding histogram method for AE testing, which makes it possible to reduce the requirements for the accuracy of mechanical angular input measure through the use of precision techniques. A structural diagram of a device implementing AE metrological testing based on a sliding histogram method is proposed. An important feature of a new method is the formation of resultant angular action on AE input shaft by summing independently generated variable and constant angular components, the step of which is mechanically reduced. An algorithm for acquiring local histograms while shifting constant angular component with a step close to the expected angular step of AE up to a full revolution of its input shaft is described. The author shows how differential (DNL) and integral (INL) nonlinearities of AE are calculated from the constructed overall histogram. Nonlinearity error in a new method occurs only in case of combined nonlinearity of variable angular component and an error in the step of constant angular component shift.

Keywords: *sliding histogram method, precision technique, absolute encoder, reduction, quantization interval, overall histogram, differential nonlinearity, integral nonlinearity, transfer function.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2026-97-303-308

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 statricheskih 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).