

## Абсолютные высокоточные датчики угла нового поколения

Ю. А. ГРОДЕЦКИЙ, Ю. Е. ДУКАРЕВИЧ, Ю. М. ИВАНОВ, А. С. СИНИЦЫН

ЗАО «МЕРА», С.-Петербург, Россия, e-mail: mera1@mail.wplus.net

Представлены методы и средства построения абсолютных угловых энкодеров нового поколения, построенных на современной элементной базе. Описываются коллимационная и рефлекторная схемы приборов и анализируются их основные свойства. Приводятся вычислительные алгоритмы обработки информации и оценки погрешностей приборов, показаны результаты лабораторных испытаний метрологических характеристик опытных образцов приборов.

**Ключевые слова:** КМОП-матрица, коллимационная схема, конденсор, процессор, светящаяся щель, систематическая погрешность, случайная погрешность, суммарная погрешность, угловой энкодер.

The methods and tools for construction of absolute angle new generation encoders, builded on modern components are presented. The instruments collimation and reflex schemes are described with the analysis of their basic properties. The computational algorithms for information processing and the instruments errors estimations are presented and the results of instruments prototypes metrological characteristics laboratory tests are shown.

**Key words:** CMOS-matrix, collimation scheme, condenser, processor, illuminated slit, random error, total error, angle encoder.

В измерительной технике широко представлены прецизионные преобразователи угла (угловые энкодеры), разработанные еще в середине прошлого века. Наиболее эффективными и проверенными практикой являются фотоэлектрические преобразователи [1—3]. Эти приборы абсолютно-

го и инкрементного типов, построенные на элементной базе XX века (фото- и светодиодах, вычислителях малой мощности и т. д.), мало соответствуют требованиям сегодняшнего дня по точности измерений, габаритным размерам и массе приборов, по функциональным и эксплуатационным возможностям. Современная элементная база фотоэлектрических приборов (мегапиксельные ПЗС и КМОП-матрицы, лазерные диоды, микропроцессоры и т. п.) значительно расширяет возможности построения схем приборов и позволяет создавать приборы нового поколения.

Ранее предпринимались попытки построения угловых энкодеров на новой элементной базе [4, 5], однако они оказались неудачными и не привели к качественному улучшению основных параметров приборов. Причиной этих неудач являлось то, что они строились не на двумерных ПЗС-матрицах, а на одномерных фотоприемниках (ПЗС-линейках), что приводило к чрезвычайно сложным оптическим схемам и не позволяло увеличить точность измерений за счет оптимальных методов обработки информации.

Ниже приводятся описания первых приборов нового поколения.

Прибор М071 (датчик угла круговой, мод. 1), структурная схема которого представлена на рис. 1, а, состоит из контрольного элемента (КЭ), жестко крепящегося на оси контролируемого объекта; измерительного блока (ИБ); устройства обработки измерительной информации — персонального компьютера (ПК) [6]. Схема КЭ содержит осветитель (светодиод 1, точечная диафрагма 2, конденсор 3) и сигнальную маску 4, устанавливаемую в фокальной плоскости объектива 5. Измерительный блок состоит из объектива 6 и многоэлементного фотодетектора (КМОП-матрицы 7 со штатной электронной платой). Выходной сигнал с фотодетектора по высокоскоростному USB 2.0 порту поступает на процессор, который произво-

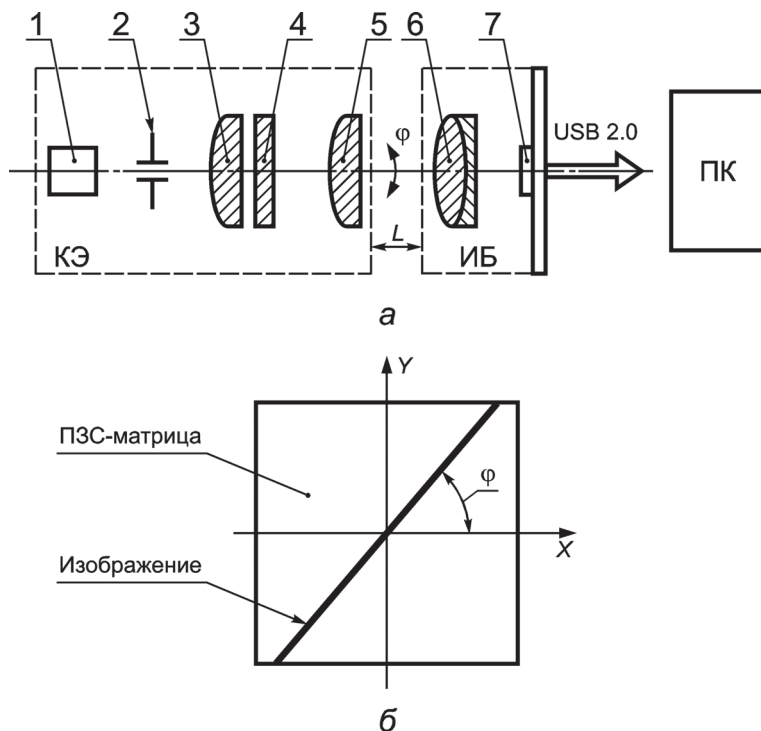


Рис. 1. Структурная схема прибора М071 (а) и детектирование изображения (б):

1 — светодиод; 2 — точечная диафрагма; 3 — конденсор; 4 — сигнальная маска; 5 — фокальная плоскость объектива; 6 — объектив; 7 — КМОП-матрица

дит необходимые вычислительные операции и формирует выходной цифровой код измеряемого угла  $\varphi_{\text{изм}}$  разворота КЭ относительно приемного модуля прибора. Сигнальная маска 4 представляет собой прозрачную узкую щель на непрозрачном фоне, выполненную на стеклянном диске или с помощью металлических ножей.

Схема прибора M071 функционирует следующим образом. Осветитель создает равномерную и стабильную во времени засветку маски, расположенной в фокальной плоскости объектива 5. В фокальной плоскости приемного объектива 6 строится изображение светящейся щели маски. В этой же плоскости располагается приемная плоскость матрицы, производящей детектирование изображения сигнальной щели, преобразуемое в измеряемый угол  $\varphi_{\text{изм}}$  (рис. 1, б). С помощью специальных алгоритмов в ПК производятся необходимая обработка информации и вычисления угла  $\varphi_{\text{изм}}$  поворота КЭ относительно приемной системы координат XY ИБ. Система координат XY задается геометрией приемной КМОП-матрицы, жестко связанной с корпусом ИБ. Поскольку схема является коллимационной, это обеспечивает следующие функциональные возможности датчика, недоступные для современных аналогов:

расстояние между КЭ и ИБ может варьироваться в пределах  $0 - L_{\text{max}}$  ( $L_{\text{max}} \leq 10$  мм), что предоставляет большую свободу для различных приложений;

оптическая схема датчика нечувствительна к поступательным перемещениям КЭ, а примененные алгоритмы обработки информации делают схему прибора нечувствительной и к «шумовым» угловым смещениям КЭ;

свойства схемы позволяют отказаться от подвижных частей (ротора) в конструкции датчика угла, что обуславливает высокую точность измерений, простоту и относительно низкую себестоимость прибора;

оптическая «связь» между КЭ и ИБ датчика угла делает ненужной механическую связь в виде всевозможных соединительных муфт, приводящую к снижению точности измерений и усложнению конструкции измерительного модуля.

Прибор M072 (датчик угла круговой, мод. 2) построен по авторефлекторной схеме с пассивным контрольным элементом и состоит (рис. 2, а) из осветителя (светодиода 1, точечной диафрагмы 2, конденсатора 3, аналогичных соответствующим элементам схемы прибора M071), КЭ 4 и ПК. Устанавливаемый на оси измеряемого объекта КЭ 4 представляет собой оптический диск с узким зеркальным штрихом. ИБ датчика кроме схемы осветителя содержит светодиод 5, приемный объектив 6 и КМОП-матрицу 7, аналогичные элементам схемы прибора M071.

Схема прибора M072 функционирует следующим образом. Световой поток осветителя, частично отразившись от светодиода, направляется на КЭ. Отраженный от зеркального штриха КЭ, световой поток направляется в ИБ и строит в плоскости фотодетектора изображение светящегося узкого штриха. Это изображение аналогично изображению светлой линии на рис. 1, б. Поэтому вся дальнейшая процедура обработки информации и формирования величины угла  $\varphi_{\text{изм}}$  такая же, как и для схемы прибора M071.

Схема прибора M072 обладает теми же преимуществами перед современными аналогами, что и схема прибора M071. Отличие первой схемы от второй состоит в том, что расстояние  $L_0$  между КЭ и ИБ фиксировано и постоянно.

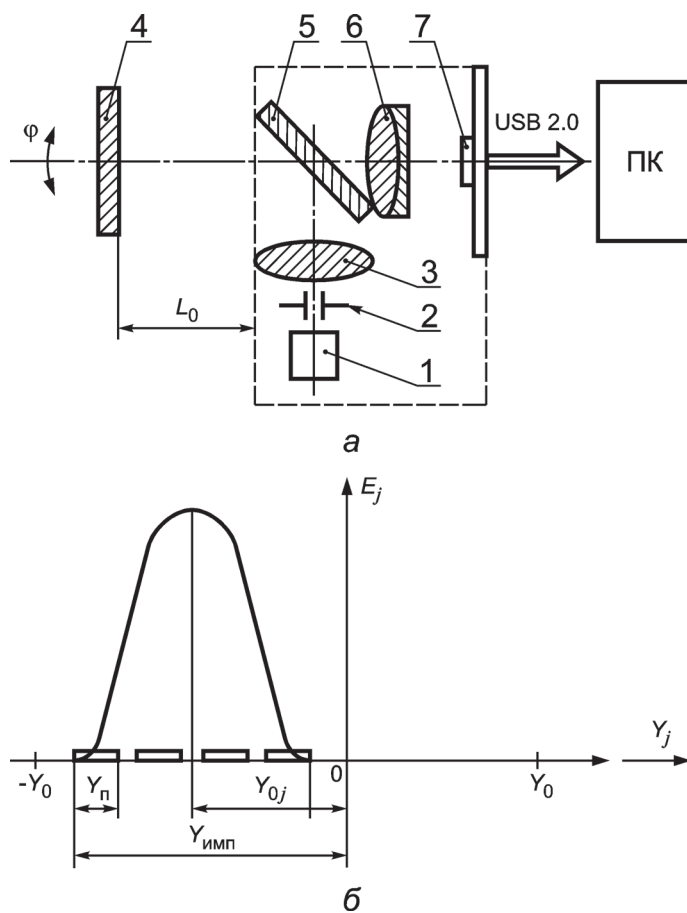


Рис. 2. Структурная схема прибора M072 (а) и функция  $E_j(y)$  (б): 1 — светодиод; 2 — точечная диафрагма; 3 — конденсор; 4 — контрольный элемент; 5 — светодиод; 6 — приемный объектив; 7 — КМОП-матрица

Основные алгоритмы вычисления измеряемого угла  $\varphi_{\text{изм}}$ . Вычислительный алгоритм имеет вид, выраженный формулой,

в аналоговом виде:

$$\text{tg } \varphi_{\text{изм}} = \frac{\int_{-X_0}^{X_0} y(x) dx}{X_0^2}, \quad (1)$$

в цифровом виде:

$$\varphi_{\text{изм}} = \arctg \left( \frac{\sum_{i=0}^{N_x-1} \sum_{j=0}^{m_y-1} jE_{ij}}{\sum_{i=0}^{N_x-1} \sum_{j=0}^{m_y-1} E_{ij}} - \frac{\sum_{i=0}^{N_x-1} \sum_{j=m_y}^{N_y-1} jE_{ij}}{\sum_{i=0}^{N_x-1} \sum_{j=m_y}^{N_y-1} E_{ij}} \right), \quad (2)$$

где  $y(x)$  — функция изображения сигнального штриха;  $X_0$  — пространственные размеры приемной КМОП-матрицы по

оси  $x$ ;  $N_x$  — размерность КМОП-матрицы вдоль оси  $x$  (число столбцов);  $m_x$  — координата середины изображения вдоль оси  $x$ ;  $N_y$  — размерность КМОП-матрицы вдоль оси  $y$  (число строк);  $m_y$  — координата середины изображения вдоль оси  $y$ ;  $E_{ij}$  — амплитуда сигнала в точке  $[i, j]$ ;  $i$  — номер столбца матрицы (по оси  $y$ );  $j$  — номер строки матрицы (по оси  $x$ ).

При углах  $|\varphi| > 45^\circ$  производится инверсия, т. е. замена строк матрицы на столбцы матрицы (замена  $X$  на  $Y$  в (1)). В свою очередь величина  $u(x)$  для каждой  $j$ -й строки определяется как  $u_j$  по координате энергетического центра изображения отсчетного штриха, т. е.

$$y_j(x) = \frac{\int_{-Y_0}^{Y_0} y E_j(y) dy}{\int_{-Y_0}^{Y_0} E_j(y) dy},$$

где  $Y_0$  — пространственные размеры приемной КМОП-матрицы по оси  $Y$ ;  $E_j(y)$  — функция распределения энергии изображения точек штриха по оси  $y$ .

Погрешность результатов измерений угла поворота контролируемого объекта  $\Delta\varphi_{\text{изм}}$  таким датчиком определяется главным образом погрешностью непосредственно датчика, поскольку погрешностью метода в данной схеме измерения можно пренебречь, так как из рис. 2, б видно, что ширина отсчетного импульса  $Y_{\text{имп}}$  больше размера пикселя приемной матрицы  $Y_n$  (в датчике реализовано соотношение  $Y_{\text{имп}}/Y_n = 7$ ). Поэтому погрешность метода измерений, вызванная пространственной дискретностью измерений по приемной матрице, мала и может не учитываться. Схематехнические свойства датчика (качество осветительной системы, параметров приемной матрицы, режима настройки и т. д.) обуславливают величину погрешности  $\delta u(x)$  определения функции  $u(x)$ . Величина  $\delta u(x)$  была экспериментально определена на опытном образце прибора M071 и находилась в диапазоне  $(0,02 - 0,03)Y_n$ .

На основании центральной предельной теоремы [7] можно утверждать, что распределение случайной величины  $\delta u_j(x)$  по строкам фотоприемной матрицы подчиняется нормальному закону. Поэтому с учетом (2) может быть получено выражение для случайной погрешности  $\Delta\varphi_{\text{сл}}$

$$\Delta\varphi_{\text{сл}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{\delta y_j Y_n}{N y_n} = \frac{\delta y_j}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}. \quad (3)$$

С учетом (3) при  $N = 10^3$  получаем оценку  $\Delta\varphi_{\text{изм}}$

$$\Delta\varphi_{\text{сл}} \cong \frac{(2-3) \cdot 10^{-2}}{1000 \cdot 33} \cong (0,6-1) \cdot 10^{-6} \cong \cong 0,1-0,2 \text{ угл. с.}$$

В 2011 г. в ЗАО «МЕРА» был разработан и изготовлен опытный образец прибора M071 (рис. 3, а), на котором отработаны основные технические решения его построения и получены экспериментальные оценки работы. Проводились измерения следующих параметров опытного образца: среднего квадратического отклонения  $\sigma$  для серии фиксированных значений измеряемого угла  $\varphi_{\text{изм}}$  разворота контрольного элемента; кратковременной нестабильности  $\Delta\varphi_{\text{н1}}$  угла  $\varphi_{\text{изм}}$  за 10 мин (рис. 4, а); долговременной нестабильности  $\Delta\varphi_{\text{н2}}$  угла  $\varphi_{\text{изм}}$  за 6 ч (рис. 4, б).

Все измерения проводились на испытательном стенде, обеспечивающем разворот контрольного элемента на фиксированный угол  $\varphi_{\text{изм}}$  и надежное закрепление его относительно приемного модуля (рис. 3, б).

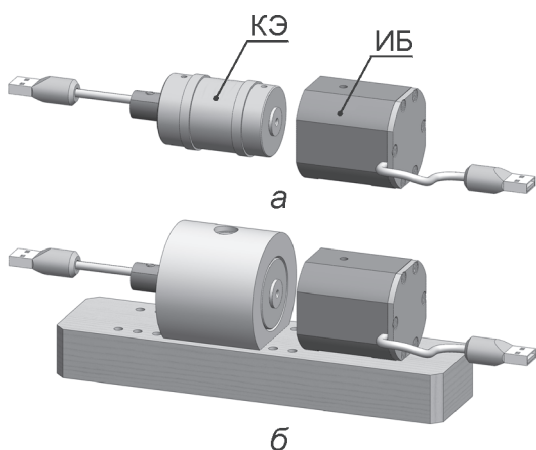


Рис. 3. Прибор M071: конструктивное исполнение (а) и испытательный стенд (б)

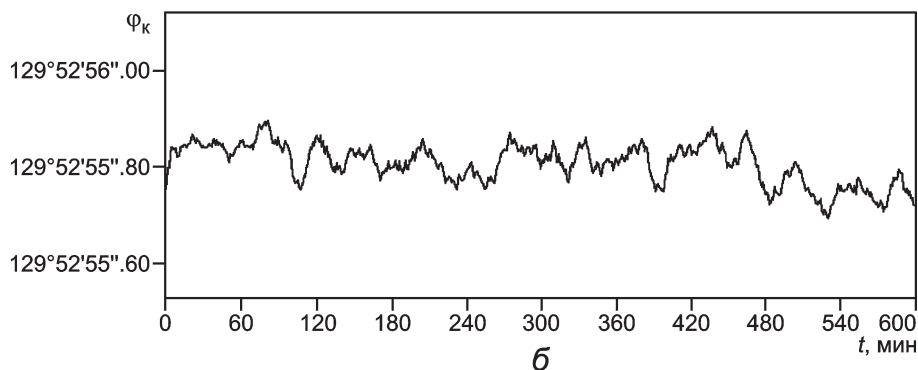
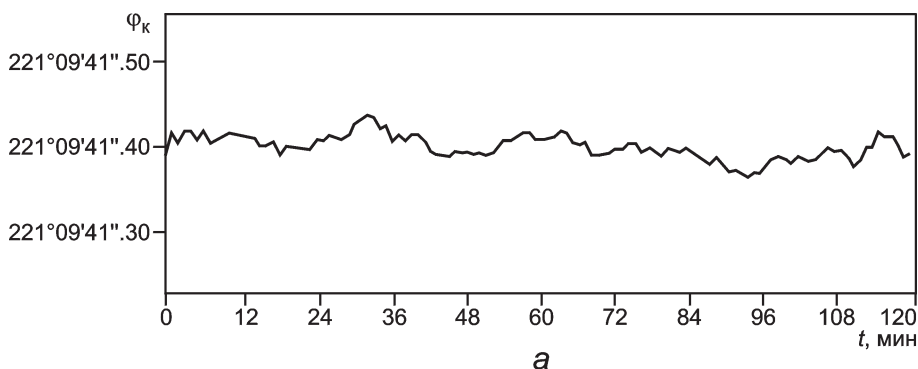


Рис. 4. Графики кратковременной стабильности угла  $\varphi_k$  за 10 мин (а) и долговременной стабильности угла  $\varphi_k$  за 6 ч (б)

Сравнительные характеристики прибора М071 с аналогичными приборами, обладающими наивысшей точностью

Характеристики	СКБ ИС ЛИР-ДА 190	Heidenhain RON 905	Renishaw SIGNUM	ЗАО «МЕРА» М071
Способ измерений	абсолют.	инкр.	инкр.	абсолют.
Точность системы	$15'' \pm 5''$	$\pm 0,4''$	$\pm 0,4''$	$\pm 0,2''^*$
Осевой люфт, мм	$\leq \pm 0,01$	$\pm 0,2$	бесконт.	бесконт.
Габаритные размеры	$\varnothing 90 \times 70$	$\varnothing 170 \times 60$	$\varnothing 550 \times \dots$	$\varnothing 50 \times 50$
Масса, кг	0,7	~ 4	~ 1,5	~ 0,5
Стабильность измерения угла	данные отсутствуют	данные отсутствуют	данные отсутствуют	$\Delta\varphi_t = \pm 0,04''$ $t = 10$ мин $\Delta\varphi_t = \pm 0,10''$ $t = 200$ мин
Наличие подвижных (вращающихся) элементов	есть	есть	есть	нет
* Погрешность измерений.				

Стенд устанавливался на поверочной плите, расположенной на третьем этаже здания промышленного типа, т. е. в условиях воздействия промышленных вибраций в диапазоне частот 5 — 100 Гц.

Результаты проведенных испытаний позволяют сделать следующие выводы:

случайная погрешность измерений углов, выполненных на опытном образце,  $\Delta\varphi_{сл} = \pm 3\sigma = 0,06 — 0,15$  угл. с, что совпадает с расчетными оценками (3);

кратковременная нестабильность  $\Delta\varphi_{н1}$  опытного образца на уровне  $\pm 0,04''$  за 10 мин;

долговременная нестабильность  $\Delta\varphi_{н2}$  опытного образца на уровне  $\pm 0,10''$  за 200 мин.

Современным угловым энкодерам присущи погрешности, вызванные вращением ротора, дефектами механических соединительных муфт и т. п., в связи с чем параметры временной нестабильности отсчетов, как правило, не приводятся вообще. Высокая временная стабильность приборов М071 и М072 весьма полезна для систем навигации, слежения, наведения, а также для целей метрологии.

В связи с изложенным выше, суммарная погрешность  $\Delta\varphi_{\Sigma}$  датчика для опытного образца прибора М071 запишется как

$$\Delta\varphi_{\Sigma} = \sqrt{\Delta\varphi_{сл}^2 + \Delta\varphi_{сист}^2 + \Delta\varphi_{н}^2}, \quad (4)$$

где  $\Delta\varphi_{сл}$ ,  $\Delta\varphi_{сист}$  — случайная и систематическая погрешности;  $\Delta\varphi_{н}$  — нестабильность.

Неисключенная систематическая погрешность  $\Delta\varphi_{сист}$  для схемы прибора М071 также невелика, поскольку эта схема осесимметрична и геометрические aberrации оптической схемы в значительной степени сглаживаются. Основным источником  $\Delta\varphi_{сист}$  являются геометрические aberrации объектива и полевые вариации электрических параметров приемной ПЗС-матрицы и их влияние на измерение угла  $\varphi_{изм}$ . Их выявление представляется сложной задачей, учитывая их малую величину, которая должна быть сравнима со случайной погрешностью  $\Delta\varphi_{сл}$ , т. е. на уровне 0,03 — 0,1". В связи с чем указанная погрешность должна находиться, по мнению разработчиков, на уровне  $\pm 0,05''$ . В этом случае (4) принимает значение

$$\Delta\varphi_{\Sigma} = \sqrt{(0,06)^2 + (0,06)^2 + (0,05)^2} \approx 0,10 \text{ угл. с.}$$

Определенную проблему представляет собой организация метрологической аттестации приборов такого класса точности, поскольку эти точности находятся на уровне верхнего звена поверочной схемы Государственного эталона плоского угла ( $S = 0,01''$ ,  $\Theta = 0,02''$ ).

В таблице приведены сравнительные характеристики прибора М071 с аналогичными приборами, обладающими наивысшей точностью.

В заключение перечислим основные преимущества приборов М071 и М072 по сравнению с современными аналогами:

повышенная точность измерений, достигающая величин 0,1 — 0,2 угл. с. Наиболее точные современные аналоги имеют погрешность на уровне 0,4 — 0,5 угл. с (см. таблицу);

монолитная (без вращающихся узлов) схема прибора, позволяющая обеспечить долговременную стабильность выходных данных при более простой и дешевой конструкции датчика;

бесконтактная связь измерителя с объектом измерений; значительно меньшие габаритные размеры и масса приборов;

новые функциональные возможности для коллимационных схем прибора М071, позволяющие проводить измерения при значительных и переменных расстояниях между прибором и объектом.

#### Л и т е р а т у р а

1. Якушков Ю. Г. Высокоточные угловые измерения. М.: Машиностроение, 1987.
2. Меськин И. В. Фотоэлектрические преобразователи угловой величины в цифровой код. М.: Судпромгиз, 1962.
3. Интерполяционные цифровые преобразователи угла. М.: Румб, 1987.
4. Патент США № 5018853 от 28.05.1991.
5. Патент Германии № DE 102007023991A1, 2008.
6. Патент РФ № 2009108223/28 (011019) Абсолютный преобразователь угла. Ю. Е. Дукаревич, М. Ю. Дукаревич // Бюл. изобрет. 2011. № 14.
7. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1971. С. 80.

Дата принятия 11.03.2012 г.