

УДК 53.087.92 + 681.7.064.64

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА

В. П. Кирьянов¹, А. В. Кирьянов^{2,3}

¹Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

²Новосибирский государственный технический университет,
630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

³Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41
E-mail: kiryanov@iae.nsk.su
alexey@tdisie.nsc.ru

Проанализированы основные источники и методы снижения погрешностей фотоэлектрических цифровых преобразователей угла инкрементального типа. Предложен метод построения фотоэлектрических преобразователей комбинированного типа, позволяющих повысить точность измерений угла поворота. Результат достигается за счёт одновременного измерения угла поворота и текущих отклонений оси вала преобразователя в радиальном направлении.

Ключевые слова: цифровые преобразователи угла, фотоэлектрический преобразователь комбинированного типа, метод путевого усреднения, технология растрового сканирования.

Введение. В настоящее время фотоэлектрические цифровые преобразователи угла (ФЦПУ) обеспечивают наиболее высокую точность угловых измерений при существенно меньших по сравнению с другими типами ЦПУ массогабаритных показателях. Однако проблема создания ФЦПУ с улучшенными массогабаритными и точностными параметрами по-прежнему является актуальной.

Задача данной работы — рассмотреть современные способы повышения точности преобразователей и оценить возможности предложенного авторами нового метода на основе фотоэлектрических преобразователей комбинированного типа, позволяющего существенно поднять точность угловых измерений относительно достигнутого уровня.

1. Принцип построения инкрементальных ФЦПУ и основные источники их погрешностей. В ФЦПУ используется промежуточное преобразование угла поворота, при котором изменяются интенсивности светового поля. На рис. 1 приведена типичная схема инкрементального ФЦПУ, содержащая измерительный растр с определённым числом штрихов и меткой нуля и считывающую головку. В её состав входят: осветительный блок, состоящий из светодиода и конденсора, индикаторная решётка и фотодиоды [1]. Измерительный растр вместе с индикаторной решёткой образует так называемое растровое сопряжение. Выбирая их параметры, можно получить функцию пропускания заданной формы с требуемым коэффициентом модуляции, имеющую большое значение для снижения погрешности измерения угла поворота [2]. В считывающей головке штрихи индикаторных растров нанесены со взаимным сдвигом на $1/4$ периода растра w [1]. Фотоприёмники, сопряжённые с индикаторными растрами, позволяют формировать выходные квадратурные сигналы, необходимые для определения величины и направления смещения

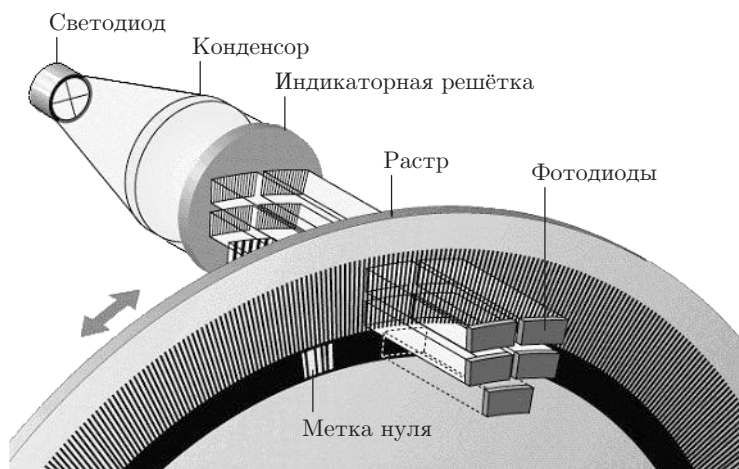


Рис. 1. Устройство инкрементального углового преобразователя

измерительного растра:

$$U_1 = U_0 + U_m \sin \theta; \quad U_2 = U_0 + U_m \sin(\theta + 90^\circ) = U_0 + U_m \cos \theta; \quad (1)$$

$$U_3 = U_0 + U_m \sin(\theta + 180^\circ); \quad U_4 = U_0 + U_m \sin(\theta + 270^\circ) = U_0 + U_m \cos(\theta + 180^\circ),$$

где U_0 — постоянная составляющая выходного сигнала; U_m — амплитуда переменной составляющей сигнала; θ — фаза переменной составляющей выходного сигнала. Благодаря попарному соединению фотоприёмников происходит подавление синфазной составляющей сигналов:

$$U_1 - U_3 = U_0 + U_m \sin \theta - U_0 - U_m \sin(\theta + 180^\circ) = 2U_m \sin \theta; \quad (2)$$

$$U_2 - U_4 = U_0 + U_m \cos \theta - U_0 - U_m \cos(\theta + 180^\circ) = 2U_m \cos \theta.$$

Как любые цифровые преобразователи физических величин, ФЦПУ характеризуются двумя основными видами погрешности преобразования: погрешностью квантования и инструментальной. Применительно к ФЦПУ погрешность квантования обратно пропорциональна максимальному числу кодовых комбинаций на выходе преобразователя, отнесённых к полному повороту вала преобразователя [3]. Различают основной шаг квантования Δ , определяемый числом штрихов растра N , и дополнительный — $\delta = \Delta/k$, формируемый коэффициентом интерполяции k , который задаёт число различаемых состояний внутри основного шага квантования. В ФЦПУ с растрами амплитудного типа максимальное число штрихов измерительного растра имеет чёткое физическое ограничение, вносимое явлением дифракции света на периодических структурах. Считается, что явление дифракции можно не учитывать, если период штрихов много больше длины волны света, освещающего растровое сопряжение [2]. Как правило, в ФЦПУ амплитудного типа применяют растры с периодом ≥ 10 мкм. Если учесть, что габаритные размеры таких преобразователей 80–200 мм, а число штрихов измерительного растра 18000–36000, то основное угловое разрешение не превышает 72–36". Поэтому для повышения точности измерений используют так называемую внутришаговую интерполяцию. В современных приборах наибольшее распространение получил арктангенсный алгоритм

$$\theta_i = \operatorname{arctg} \frac{U_{m_i} \sin \theta}{U_{m_i} \cos \theta}, \quad (3)$$

где U_{m_i} — амплитуды синхронных отсчётов выходных квадратурных сигналов считывающей головки. Для интервала $-45 < \theta_i < 45^\circ$ значение функции $\operatorname{tg} \theta_i$ не превышает ± 1 . В этом интервале текущее значение θ_i определяется с наибольшей точностью. На практике точность данного вида алгоритма ограничена нелинейными искажениями формы выходных сигналов считывающих головок преобразователей, их отличием от идеальных гармонических сигналов. При использовании растров с периодом штрихов ≤ 20 мкм коэффициенты интерполяции доходят до 2^8 – 2^{10} . Это означает, что шаг квантования уменьшается до 78–20 нм, а угловая погрешность квантования в ФЦПУ, имеющих растры диаметром от 80 до 200 мм, не будет превышать 0,28–0,05'' и для многих приложений уже не будет доминирующей.

Таким образом, с учётом усложнённых алгоритмов интерполяции результирующая погрешность ФЦПУ определяется инструментальными составляющими: ε_e — погрешность от эксцентриситета e установки растра на вал; $\varepsilon_{\text{п}}$ — погрешность от биения подшипников вала, на который установлен измерительный растр; $\varepsilon_{\text{р}}$ — погрешность изготовления измерительного растра.

В общем случае вклад эксцентриситета e в погрешность измерения угла можно представить как

$$\varepsilon_e = e(\sin \Phi / R). \quad (4)$$

Здесь Φ — значение текущего угла поворота, R — радиус измерительного растра. Из выражения (4) видно, что требования к точности установки растров увеличиваются с уменьшением габаритных размеров ФЦПУ. Например, для ФЦПУ с растрами диаметром 180 мм удельный вклад ε_e составляет $\pm 2,3''$ на каждый микрон эксцентриситета, а с диаметром 80 мм будет $\pm 5,2''$. Конкретное значение эксцентриситета e для каждого образца ФЦПУ — величина достаточно случайная, но после установки растра на вал это случайное значение остаётся неизменным, т. е. по своей природе ε_e относится к систематическим погрешностям.

Количественно вклад биений подшипников в погрешность измерения угла аналогичен вкладу эксцентриситета:

$$\varepsilon_{\text{п}} = \sigma / R \quad (5)$$

(здесь σ — среднеквадратичное значение биений подшипников, используемых в ФЦПУ), но отличается качественно. Известно, что точностные показатели подшипников регламентируются производителем в соответствии с тем или иным стандартом. Так, в международном стандарте ISO или японском национальном стандарте JIS [4] указано, что реальные биения подшипников включают в себя как синхронные составляющие (в том числе радиальные и осевые биения), так и асинхронные, изменяющиеся от оборота к обороту. Биения, асинхронные с вращением, получили название NRRO (Non-Repetitive Run-Out). Они характеризуются параметром σ . Основными источниками асинхронных биений являются отклонения формы и неравномерность тел качения, износ сепаратора и колец подшипника и т. д. Из результатов исследований, приведённых в [5], следует, что $\varepsilon_{\text{п}}$ — случайная величина.

И, наконец, вклад $\varepsilon_{\text{р}}$ пропорционален накопленной погрешности деления растра на интервале m штрихов, прошедших перед фотоприёмниками при повороте растра на угол Φ [6]. По своей природе $\varepsilon_{\text{р}}$ также относится к систематическим погрешностям.

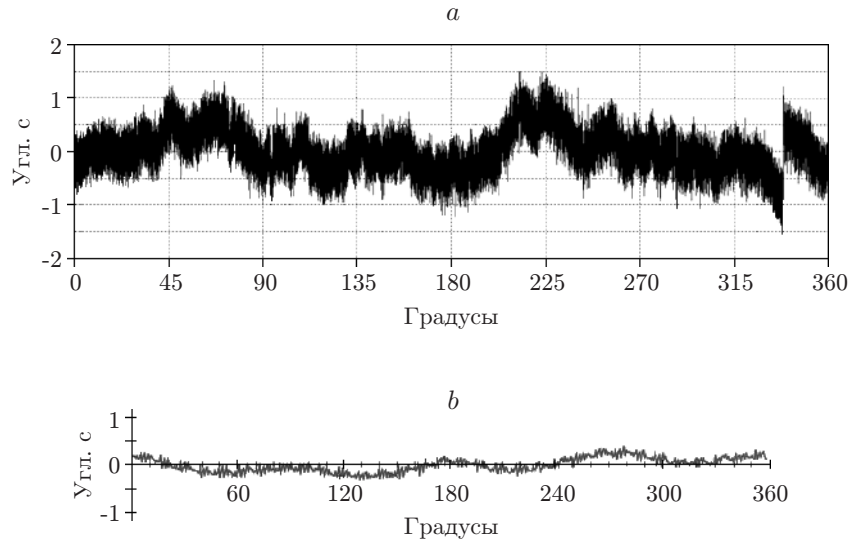


Рис. 2. Точностные параметры преобразователя ROD-800: a — погрешность раstra, b — погрешность преобразователя

2. Классические методы повышения точности ФЦПУ инкрементального типа. В настоящее время основным методом снижения погрешности ФЦПУ является применение принципа путевого усреднения [7], использующего в конструкции преобразователя несколько дополнительных считывающих головок (однотипных с основной головкой), расположенных по кругу с равным шагом, выходные сигналы которых суммируют с выходным сигналом основной головки. Эффект снижения погрешности преобразования существенно зависит от числа дополнительных головок. Повышение результирующей точности ФЦПУ при использовании четырёх считывающих головок показано на рис. 2, a, b . Из графика на рис. 2, a видно, что погрешность измерительного раstra порядка $\pm 1,5''$ [6], в то время как погрешность ФЦПУ, созданного на основе подобного раstra, не превышает $\pm 0,5''$ (см. рис. 2, b), т. е. почти в 3 раза меньше, чем исходная погрешность раstra. Погрешность преобразователя свободна, прежде всего, от ε_e , а также от всех нечётных гармоник и ряда чётных (2, 6, 10 и т. д.) гармоник, вносимых ε_n и ε_p .

Однако методу путевого усреднения свойственны некоторые ограничения. Рассмотрим преобразователь, имеющий идеально изготовленный растр, установленный на вал с идеальными подшипниками, но эксцентрично относительно оси вала. Тогда выходные квадратурные сигналы основной головки могут быть представлены как

$$U_{11} = 2U_m \sin(2\pi/w)(\Phi R + e); \quad U_{12} = 2U_m \cos(2\pi/w)(\Phi R + e). \quad (6)$$

Пусть в данном преобразователе используется одна дополнительная считывающая головка, расположенная диаметрально противоположно основной. В таком случае выходные сигналы могут быть записаны в виде

$$U_{21} = 2U_m \sin(2\pi/w)(\Phi R - e); \quad U_{22} = 2U_m \cos(2\pi/w)(\Phi R - e). \quad (7)$$

Если в соответствии с принципом путевого усреднения сложить одноимённые сигналы обеих головок, то получим следующие выражения:

$$U_{11} + U_{21} = 4U_m \cos(2\pi/w)e \cdot \sin(2\pi/w)\Phi R; \quad (8)$$

$$U_{12} + U_{22} = 4U_m \cos(2\pi/w)e \cdot \cos(2\pi/w)\Phi R,$$

т. е. происходит формирование двух новых квадратурных сигналов, фаза которых не искажена эксцентриситетом установки раstra на оси, но амплитуда этих сигналов промодулирована по закону $\cos(2\pi/w)e$. Глубина модуляции пропорциональна величине отношения эксцентриситета e к периоду w . Например, при $e = 1/4w$ имеет место 100 %-ное уменьшение амплитуды вновь сформированных квадратур и, как следствие, в некотором угловом секторе полностью нарушается ход преобразования угла поворота в код. Реально нарушения функционирования преобразователей возникают при существенно меньшей величине модуляции. Поэтому производители ФЦПУ не допускают модуляции амплитуды суммарных квадратур более чем на 10 % от максимума, что соответствует значению допускаемого эксцентриситета (как от неточной вклейки раstra, так и от биения подшипников) — не более 0,1 периода раstra.

3. Другие методы повышения точности ФЦПУ. Упростить конструкцию ФЦПУ и повысить её точность производители пытаются, используя различные методы коррекции при наличии только одной считывающей головки [8]. Алгоритмы коррекции предполагают предварительное снятие данных о погрешности собранного преобразователя и вычитание их из текущих измерений. Для этого в устройстве обработки выделяют специальный блок памяти, где хранится файл с измеренными данными, информацию из которого считывают в соответствии с текущей угловой координатой вала.

Можно показать, что этот путь имеет принципиальные ограничения по возможностям повышения точности угловых измерений, так как не позволяет устранить случайные составляющие погрешности преобразования. Пусть после сборки преобразователя его результирующая погрешность $\delta(\Phi)$ определена с помощью углоизмерительной установки. Как правило, эта зависимость представляет собой композицию трёх составляющих $\varepsilon_e, \varepsilon_{\Pi}, \varepsilon_p$:

$$\delta(\Phi) = \varepsilon_p + \varepsilon_e + \varepsilon_{\Pi_i}, \quad (9)$$

где ε_{Π_i} — i -я реализация составляющей погрешности ε_{Π} , вносимой биениями подшипников преобразователя. С большой долей вероятности можно утверждать, что в результате внесения зарегистрированных данных составляющие ε_e и ε_p будут подавлены полностью, а вклад случайной составляющей ε_{Π_i} — только частично, поскольку текущий вклад биений подшипника в момент измерения угла поворота объекта не будет совпадать со значениями, зафиксированными в блоке памяти устройства обработки. В итоге выполнения операции коррекции эти случайные реализации сложатся по закону случайных чисел и после усреднения на число выборок дадут следующий результат:

$$\varepsilon_{\Pi} = \sqrt{\varepsilon_{\Pi_i}^2 + \varepsilon_{\Pi_{(i+1)}}^2}, \quad (10)$$

где ε_{Π_i} и $\varepsilon_{\Pi_{(i+1)}}$ — случайные значения вклада биений подшипников в i -й и $(i+1)$ -й моменты снятия показаний датчика; ε_{Π} — результат совместного действия двух случайных выборок. Последнему можно поставить в соответствие σ .

Данный вывод проиллюстрирован на примере ФЦПУ ROD-280 фирмы "Heidenhain" (Германия) [1]. Преобразователь имеет одну считывающую головку, а в шпиндельном узле использованы прецизионные подшипники, имеющие радиальное биение внутренних колец 1,5 мкм. Величину совместного действия эксцентриситета установки раstra на вал и биений подшипников можно оценить как 1,5–2,5 мкм. При диаметре раstra, равном 60 мм, возмущающее действие указанных составляющих будет лежать в диапазоне $\pm(10,3-17,2'')$ [1]. Согласно методике, изложенной в [6], погрешность формирования топологии раstra преобразователя не превысит значения $\pm 2,0''$. Совместное действие этих трёх источников возмущений должно привести к появлению погрешности преобразователя порядка

$\pm(10,5-17,3'')$, которую целесообразно отнести к систематической погрешности и можно компенсировать. В паспорте на данное изделие фирмой-изготовителем указана погрешность $\pm 1,7''$. Оставшееся некомпенсированное значение погрешности, по мнению авторов, является следствием действия несинхронной составляющей биений подшипников, равной $0,25 \text{ мкм}$ [1]. Полученный результат хорошо согласуется со значениями σ , характеризующими несинхронную составляющую биений прецизионных малогабаритных подшипников [9]. Следовательно, данный метод позволяет повысить точность (причём в ряде случаев почти на порядок), но его возможности ограничены уровнем случайных биений подшипников.

Совместное применение метода путевого усреднения и метода компенсации также имеет принципиальные ограничения возможности снижения погрешности преобразования. Такой подход был реализован фирмой "Heidenhain" в преобразователе RON-905. В нём за счёт использования четырёх считывающих головок погрешность преобразования снижена до $\pm 0,4''$. Затем путём коррекции результирующая погрешность преобразователя была снижена до $\pm 0,2''$ [1].

4. Применение фотоэлектрических преобразователей комбинированного типа. Точность угловых измерений можно существенно повысить с использованием подходов, изложенных в [10]. Результат достигается за счёт того, что при измерении угла поворота, выполняемом с помощью одной считывающей головки, по-иному организован процесс компенсации составляющих инструментальной погрешности. Здесь систематическая погрешность ε_p определяется заранее на специальной углоизмерительной установке, например АС-700 [6], запоминается и в ходе измерений угла поворота вычитается из получаемого результата. Случайную составляющую погрешности измерений $\varepsilon_{см}$, вызванную пространственной нестабильностью положения раstra при его вращении вместе с валом, вычисляют в реальном времени одновременно с измерением угла поворота с помощью дополнительной измерительной головки и вычитают из результата измерений. Функционально такая головка регистрирует линейные смещения раstra в тангенциальном направлении (относительно считывающей головки, используемой для угловых измерений). В этом заключается отличие предлагаемого метода от классического метода измерений с компенсацией погрешности. Данный тип преобразователя назвали «фотоэлектрическим преобразователем комбинированного типа». Его схема показана на рис. 3. Устройство содержит радиальный растр 1, считывающую головку 2, окружность 3, измерительную головку 4 и блоки оцифровки и масштабирования 5, формирования текущей угловой координаты 6, и блоки 7 и 8.

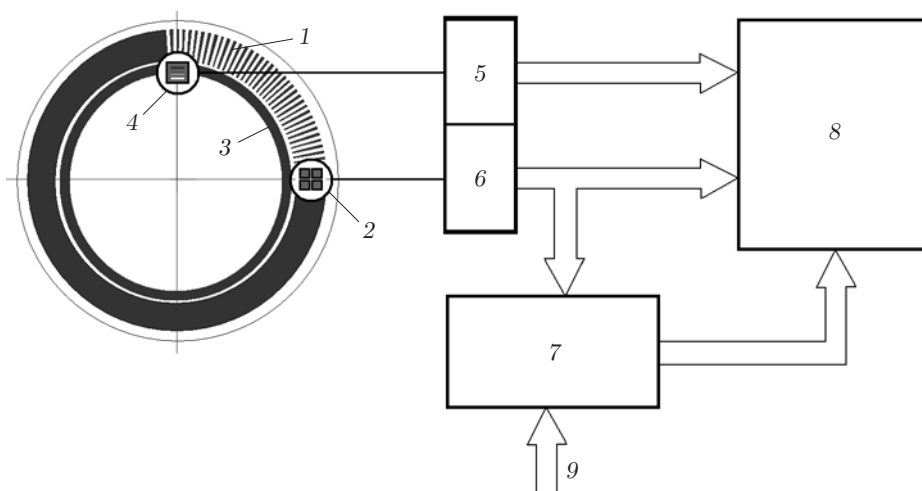


Рис. 3. Устройство фотоэлектрического преобразователя комбинированного типа

памяти 7 и коррекции результата измерений 8. Угловые смещения растра регистрируются с помощью головки считывания и блока формирования текущей угловой координаты по хорошо известным алгоритмам. Головка считывания содержит четыре индикаторных растра, в которых штрихи нанесены со сдвигом на $1/4$ периода растра. Фотоприёмники, сопряжённые с индикаторными растрами, формируют выходные электрические сигналы, описываемые выражениями (1). Однако измеренное значение θ_i отличается от истинного углового смещения на величину $(2\pi/w)(e_i \sin \Phi + \delta_i)$, состоящую из двух компонент: $(2\pi/w)e_i \sin \Phi$ — составляющей от неточной установки растра на вал и $(2\pi/w)\delta_i$ — составляющей от биений подшипников вала.

Для определения величины искажений производят измерения линейного смещения растра в тангенциальном направлении, которые осуществляют с помощью окружности, синтезированной на стеклянной заготовке одновременно с радиальным растром. Для выполнения данных требований наиболее подходящим оборудованием являются лазерные генераторы изображений, работающие в полярной системе координат и реализующие технологию записи скрытых изображений в плёнках хрома [11]. С окружностью сопряжена дополнительная измерительная головка, установленная со смещением на угол 90° относительно позиции считывающей головки. Измерительная головка сформирована на основе позиционно-чувствительного элемента, например трёхщелевого приёмника [12]. В этом элементе каждая щель приёмника смещена относительно соседней на половину собственной ширины. С каждой щелью сопряжён отдельный фотоприёмник. Выходные сигналы фотоприёмников A , B и C складывают между собой с помощью операционного усилителя в соответствии с выражением

$$U_{\text{вых}} = U_A + U_C - 2U_B, \quad (11)$$

где U_A , U_B и U_C — выходные сигналы фотоприёмников A , B и C . Когда граница окружности находится точно посередине щели B , суммарный сигнал $U_{\text{вых}}$ равен нулю. Выходной сигнал измерительной головки оцифровывается в блоке 5 и путём деления его на среднее значение радиуса измерительного растра переводится в текущее значение угловой поправки, обусловленной пространственной нестабильностью положения растра относительно оси вращения вала. В блоке 8 корректируются результаты измерений, поступившие с выходов блоков 5–7, и данные о погрешности растра ε_p 9.

Эффективность предложенной конструкции можно оценить на примере гипотетического преобразователя, аналогичного ROD-280. Пусть он имеет растр со следующими параметрами: диаметр 60 мм, погрешность $\leq (\pm 1,0'')$, число штрихов 18000 — и изготавливается с помощью модернизированного лазерного генератора изображений CLWS-300, созданного в Сибирском отделении РАН [13]. Основное разрешение преобразователя составит $72''$. Если обеспечен коэффициент интерполяции, равный 256, как в реальном ROD-280, то погрешность квантования не превысит $\pm 0,28''$.

Известно, что трёхщелевой приёмник позволяет достичь чувствительности к смещению края штриха (линии) порядка $\pm(6-8)$ нм [12]. При таких параметрах измерительной головки текущие биения вала и растра могут быть скомпенсированы до уровня, при котором их вклад в угловую погрешность данного преобразователя не превысит $\pm(0,04-0,055'')$, что почти на порядок меньше погрешности квантования.

Погрешность изготовления растра оценивается с помощью установки АС-700. В соответствии с паспортом на эту установку и многочисленными данными, полученными в ходе обмера растров, невозпроизводимость контроля составляет $\pm 0,3''$.

Статистическое сложение трёх неопределённостей, соответствующих операциям контроля погрешности растра, контроля биений границы кольцевой окружности и погрешности квантования, даст результат $\pm 0,5''$, т. е. погрешность фотоэлектрических преобразо-

вателей комбинированного типа уменьшается в 3,4 раза по сравнению с ROD-280 и становится сопоставимой с характеристиками преобразователя RON-905, имеющего растр с габаритами 170 мм.

Заключение. Использование комбинированных фотоэлектрических преобразователей, выполняющих одновременно с измерением угла поворота регистрацию радиальных смещений оси вращения углоизмерительного растра, позволит снизить неопределённость измерений угла до уровня десятых долей угловой секунды при габаритах преобразователей, не превышающих 100 мм в диаметре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Angular Encoders: General Catalog.** Traunreut, Germany: Heidenhain GmbH, 2000. 82 p.
2. **Фотоэлектрические преобразователи информации** /Под ред. Л. Н. Преснухина. М.: Машиностроение, 1974. 376 с.
3. **ГОСТ 8.009-84.** Нормируемые метрологические характеристики средств измерения. Введ. 01.01.1986. М.: Изд-во стандартов, 2003. 28 с.
4. **Precision Rolling Bearings.** Catalog N 2260-IV/E [Electronic resource] // NTN Bearing Corporation, Japan. 2010. URL: <http://www.ntnamerica.com/website/documents/brochures-and-literature/catalogs/precision-all2260.pdf> (дата обращения: 5.03.2012).
5. **Noguchi S., Kanada T.** Development of measuring system for radial non-repetitive run-out (NRRO) and perception about present state of angular contact ball bearing for machine tools // Tribology Intern. 2008. **41**, N 12. P. 1176–1180.
6. **Кирьянов В. П., Кирьянов А. В., Кручинин Д. Ю., Яковлев О. Б.** Анализ современных технологий синтеза углоизмерительных структур для высокоточных угловых измерений // Оптический журнал. 2007. **74**, № 12. С. 40–49.
7. **Ионак В. Ф.** Приборы кинематического контроля. М.: Машиностроение, 1981. 128 с.
8. **Pat. 6304825 B1 US.** Rotary encoder error compensation system and method for photoreceptor surface motion sensing and control /W. J. Nowak, K. M. Carolan, M. R. Furst, O. J. Lacayo. Publ. Oct. 16, 2001. 13 p.
9. **Bearing Runout Measurements.** Application note 243-7 [Electronic resource] // Agilent Technologies, USA. 2000. URL: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-5387E.pdf> (дата обращения: 5.03.2012).
10. **Пат. 2433413 РФ.** Способ повышения точности измерения угла поворота /А. В. Кирьянов, В. П. Кирьянов. Заявл. 15.06.2010; Опубл. 10.11.2011, Бюл. № 31. 9 с.
11. **Кирьянов А. В., Никитин В. Г.** Особенности применения технологии записи скрытых изображений в пленках хрома при синтезе прецизионных углоизмерительных структур // Автометрия. 2009. **45**, № 1. С. 109–117.
12. **Savabe M., Maeda F., Yamaryo Y. et al.** Development of the vacuum interferometric comparator for calibrating the fine linear encoders and scales // Proc. SPIE. **4900**. P. 282–289.
13. **Кирьянов А. В., Кирьянов В. П.** Улучшение метрологических характеристик лазерных генераторов изображений с круговым сканированием // Автометрия. 2010. **46**, № 5. С. 77–93.

Поступила в редакцию 5 марта 2012 г.