

**В. П. Кирьянов¹, В. Е. Зюбин^{1,2}, А. В. Кирьянов¹
А. А. Лубков¹, А. С. Максимов²**

¹ *Институт автоматики и электрометрии СО РАН
пр. Акад. Коптюга, 1, Новосибирск, 630090, Россия*

² *Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

*kiryanov@iae.nsk.su, zyubin@iae.nsk.su, alexey@iae.nsk.su
lubkov@iae.nsk.su, onixbed@gmail.com*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА, ОБУСЛОВЛЕННОЙ НЕТОЧНОСТЬЮ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАСТРА *

Смоделирована инструментальная погрешность угловых преобразователей комбинированного типа, обусловленная конечной точностью изготовления топологии измерительного растра. Получено подтверждение тезиса о том, что при компенсации инструментальной погрешности в преобразователях данного типа массив данных о погрешности растра должен использоваться в модифицированном виде, учитывающем параметры индикаторного растра, используемого в преобразователе.

Ключевые слова: фотоэлектрические преобразователи комбинированного типа, инструментальная погрешность, численное моделирование, методы повышения точности.

Введение

В настоящее время проблема повышения точности растровых фотоэлектрических угловых преобразователей (РФУП) остается актуальной. В [1] показано, что использование преобразователей комбинированного типа может оказаться эффективным средством решения указанной проблемы. Технически это достигается за счет того, что результирующая погрешность преобразователей уменьшается благодаря отдельной компенсации ее основных составляющих: систематической и случайной. При этом в качестве систематической составляющей принимается погрешность, обусловленная неточностью изготовления измерительного растра, а в качестве случайной – составляющие погрешности, вносимые имеющимся эксцентриситетом установки растра на валу преобразователя и биениями этого вала в подшипниковом узле преобразователя. Важной особенностью данного технического решения является то, что информацию о неточности изготовления растра получают заранее с помощью специальных углоизмерительных средств, а вклад от неточности установки растра на валу преобразователя и от биений этого вала в подшипниковом узле получают с помощью встроенных средств контроля непосредственно в момент измерения угла поворота. Однако в [2] на основе анализа структуры кривой погрешности РФУП было сделано предположение, что данные, используемые для компенсации систематической погрешности в угловых преоб-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 13-07-00081-А.

Кирьянов В. П., Зюбин В. Е., Кирьянов А. В., Лубков А. А., Максимов А. С. Моделирование инструментальной погрешности фотоэлектрических преобразователей комбинированного типа, обусловленной неточностью изготовления растра // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Информационные технологии. 2015. Т. 13, вып. 2. С. 34–41.

разователях комбинированного типа, не должны быть тождественными данным файла, полученным экспериментально, а должны быть трансформированы с учетом характеристик сопрягаемого с ним индикаторного раstra.

В настоящей работе этот тезис проверялся путем моделирования процесса преобразования угловых перемещений с помощью предварительно полученных данных о неточности изготовления измерительного раstra, который запланирован для использования в будущем преобразователе.

Постановка задачи

Предполагается, что топология индикаторного раstra изготовлена идеально, а измерительного раstra – с некоторой конечной точностью. Неточность пространственного положения каждого штриха измерительного раstra регистрируется предварительно с помощью специальных углоизмерительных средств и может быть представлена для анализа в виде массива данных или кривой погрешности раstra.

На рис. 1 представлена кривая погрешности измерительного раstra, использовавшегося в РФУП модели ROD-800 (фирмы Heidenhain, Германия), полученная на углоизмерительной установке АС-700 на Уральском оптико-механическом заводе (г. Екатеринбург) [3].

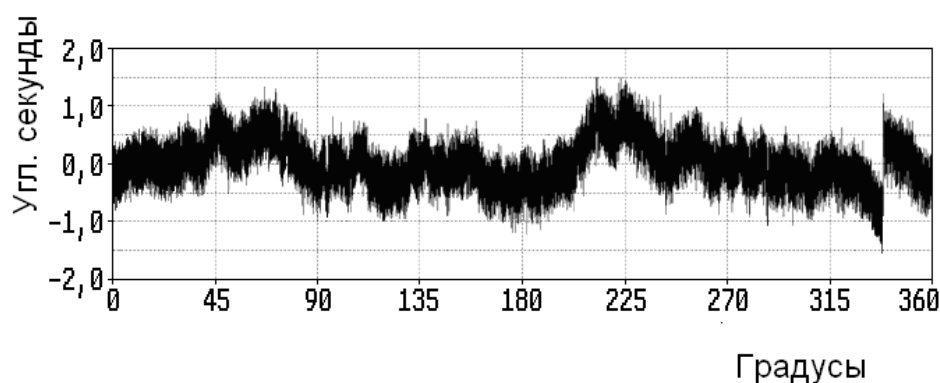


Рис. 1. График погрешности измерительного раstra датчика ROD-800

Массив данных, соответствующий этой кривой, применялся в качестве тестового в связи с наличием в нем характерной области, в виде разрыва непрерывности кривой погрешности раstra, которую целесообразно использовать для исследования взаимодействия сопрягаемых растров.

Представленная на рис. 1 кривая получена с помощью щелевого детектора, позволяющего оценивать величину отклонения переднего или заднего (по выбору) края штрихов контролируемого раstra от их идеального положения.

Моделирование ожидаемой инструментальной погрешности углового преобразователя от неточности изготовления измерительного раstra базировалось на предположении, что нестабильность пространственного положения краев штрихов раstra вызывает различие в ширине просветов соответствующих периодов сопрягаемых растров и соответствующее изменение интенсивности световых потоков, проходящих через них. И эти изменения интенсивностей световых потоков регистрируются с помощью штатных фотоприемников считывающих головок РФУП [4].

В считывающих головках растровых преобразователей фотоприемники располагаются непосредственно за индикаторным растром и имеют рабочую поверхность, как правило соизмеримую с размерами индикаторного раstra. Электрический сигнал на выходе фотоприемника $I_i(\varphi)$ пропорционален интенсивности суммарного потока S , прошедшего в данный

момент через все просветы растрового сопряжения в пределах рабочей поверхности фотоприемника. Выходной сигнал фотоприемника $I_i(\varphi)$ можно представить следующим образом:

$$I_i(\varphi) = \eta F_0 S \cdot \tau_{pc}(\varphi),$$

где φ – угол поворота вала в пределах одного периода растра; η – чувствительность фотоприемника; F_0 – световой поток; S – суммарная площадь окон растрового сопряжения; τ_{pc} – функция пропускания растрового сопряжения. Суммарную поверхность окон растрового сопряжения S в пределах рабочей поверхности фотоприемника можно представить как

$$S = \sum_{i=1}^M S_i = \sum_{i=1}^M [S_0 + \delta_i(\Phi)] = M \cdot S_0 + \sum_{i=1}^M \delta_i(\Phi), \quad (1)$$

где M – число штрихов индикаторного растра; S_i – площадь i -го окна растрового сопряжения; S_0 – стандартное сечение окон измерительного и индикаторного растров; $\delta_i(\Phi)$ – величина нестабильности пространственного положения краев i -х штрихов измерительного растра относительно их идеального положения в пределах оборота растра (Φ). Для простоты примем, что размеры рабочей поверхности фотоприемника совпадают с размерами индикаторного растра. При известном диаметре измерительного растра D второму слагаемому в (1) можно поставить в соответствие угловую погрешность растрового сопряжения $\Delta_i(\Phi)$, вызванную неточностью изготовления топологии растра и зависящую от угла поворота Φ растра:

$$\Delta_i(\Phi) \rightarrow k \frac{\tilde{\delta}_i(\Phi)}{D},$$

где $\tilde{\delta}_i(\Phi)$ – среднее по M штрихам паразитное смещение границ окон измерительного растра; k – коэффициент пропорциональности. Следовательно, оценку ожидаемой угловой погрешности преобразователя, обусловленной неточностью изготовления измерительного растра, можно получить, вычисляя для каждого i -го штриха измерительного растра значение $\tilde{\delta}_i(\Phi)$. Данная операция реализовывалась в соответствии с алгоритмом определения простого скользящего среднего с помощью подхода, представленного в [5].

Результаты моделирования инструментальной погрешности углового преобразователя, обусловленной неточностью изготовления растра

В данных расчетах предполагалось, что результаты измерения погрешности изготовления измерительного растра, взятые в качестве базы для модельных экспериментов, не были подвержены дополнительным искажениям со стороны измерительной системы, с помощью которой эти данные были получены, и отображают именно неточность изготовления растра. Тогда задачей модельного эксперимента явилось вычисление для каждого штриха измерительного растра интегральных сумм вида

$$\delta_j^*|_1^N = \sum_{j=j-M/2}^{j+M/2} \delta_j(\Phi), \quad (2)$$

где δ_j^* – угловая погрешность положения каждого штриха измерительного растра от первого до N -го, модифицированная с учетом действия индикаторного растра; N – число штрихов измерительного растра; M – число штрихов индикаторного растра; $\delta_j(\Phi)$ – угловая погрешность положения каждого штриха измерительного растра, измеренная с помощью специальной углоизмерительной системы. При этом если в (2) $(j - M/2) < 0$, то $j = (N - M/2 + j)$, или если $(j + M/2) > N$, то $j = (N - M/2 - j)$. Для расчетов выбраны параметры реального растрового сопряжения, для которого число штрихов измерительного растра $N = 36\,000$, а индикаторного – $M = 300$.

На рис. 2 представлен график ожидаемой погрешности углового преобразователя, использующего одну считывающую головку. Для наглядности восприятия результата моделирования расчетная кривая погрешности приведена совместно с исходной кривой, полученной экспериментально (верхняя часть рисунка).

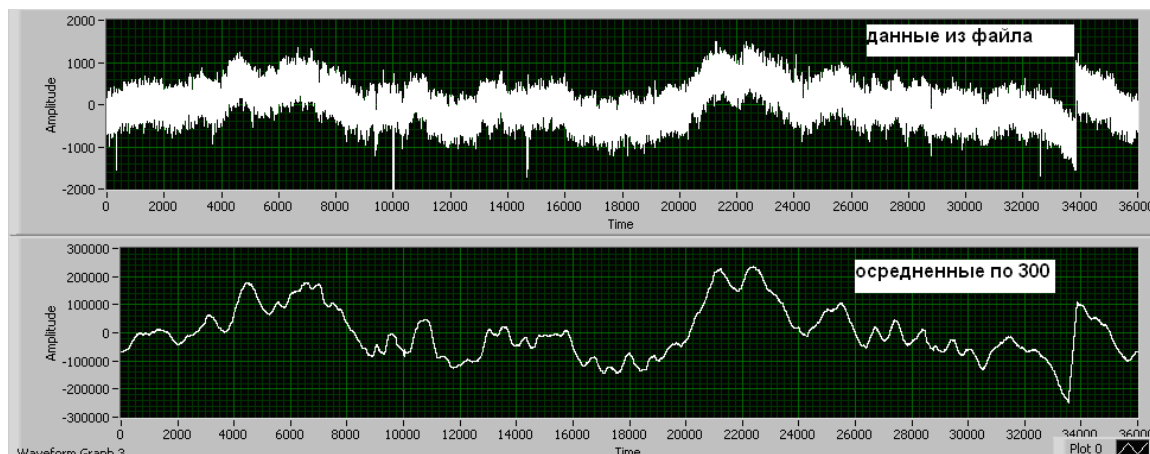


Рис. 2. Сравнение графиков угловой погрешности раstra и преобразователя с одной считывающей головкой

Сравнивая полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- растровое сопряжение проявляет свойства интегрирующего звена. Так, разрыв в исходной функции погрешности раstra в окрестности 34 000 штрихов (1-й график) трансформировался в линейно изменяющуюся в пределах от 33 700 до 34 000 штрихов (2-й график) функцию;

- шумовая составляющая кривой погрешности раstra сглаживается;
- в среднем график инструментальной погрешности преобразователя повторяет особенности кривой погрешности измерительного раstra, зарегистрированной экспериментально.

Таким образом, результат моделирования показывает, что график инструментальной погрешности РФПУ представляет собой более гладкую кривую, чем экспериментально полученный график инструментальной погрешности измерительного раstra, использованного в этом преобразователе. Поэтому использование в процессе компенсации систематической составляющей погрешности преобразования в преобразователях комбинированного типа исходного файла данных о погрешности пространственного положения каждого штриха раstra неизбежно приводит к появлению новой погрешности, которую можно назвать ошибкой компенсации – $\delta_{\text{ком}}$.

Если для каждого j -го штриха раstra вычислить $\delta_{j \text{ ком}}$ – разность между экспериментально измеренным значением погрешности пространственного положения штрихов раstra – $\delta_j(\Phi)$ и δ_j^* – погрешностью положения каждого штриха измерительного раstra, модифицированной в соответствии с (2), т. е.

$$\delta_{j \text{ ком}} = \delta_j(\Phi) - \delta_j^*,$$

то количественно ошибку компенсации $\delta_{\text{ком}}$ можно характеризовать ее среднеквадратичным отклонением (СКО) – $\sigma_{\text{ком}}$:

$$\sigma_{\text{ком}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N \delta_{j \text{ ком}}^2}. \quad (3)$$

Полученное согласно (3) значение $\sigma_{\text{ком}}$ определит тот предел, до которого может быть уменьшена инструментальная составляющая погрешности углового преобразователя комбинированного типа, обусловленная неточностью изготовления раstra, если использовать немодифицированный файл данных. Например, если для создания такого преобразователя использовать рассмотренный выше измерительный растр и в нем для компенсации систематической погрешности использовать экспериментально полученный файл данных о погрешности изготовления раstra, то возникающая ошибка компенсации, вычисленная согласно (3), будет достигать $\sigma_{\text{ком}} = 0,28''$.

Следовательно, сформулированный в [2] тезис о том, что для более полной компенсации ошибки изготовления измерительного растра экспериментально полученные данные о его погрешности должны быть трансформированы в соответствии с характеристиками сопрягаемого с ним индикаторного растра, представляется вполне обоснованным.

Чтобы убедиться, что моделирование инструментальной погрешности растрового преобразователя путем вычисления простого скользящего среднего адекватно характеризует погрешность реальных приборов, было проведено моделирование растровых преобразователей с двумя и четырьмя считывающими головками. Для последнего из указанных преобразователей известен экспериментальный результат определения с высоким разрешением его угловой погрешности [2].

В первом случае задачей модельного эксперимента являлось вычисление для каждого штриха измерительного растра интегральных сумм вида

$$\delta_j^{**} |_1^N = \sum_{j=j-M/2}^{j+M/2} \delta_j(\Phi) + \sum_{j=N/2+j-M/2}^{N/2+j+M/2} \delta_j(\Phi), \quad (4)$$

характеризующих угловую погрешность положения каждого штриха измерительного растра, модифицированную с учетом действия двух индикаторных растров. В выражении (4) первое слагаемое определяет вклад индикаторного растра, расположенного на позиции 0° , а второе – индикаторного растра, расположенного на позиции 180° .

На рис. 3 приведен график погрешности РФУП, рассчитанный в соответствии с (4). Для наглядности восприятия результата моделирования расчетная кривая погрешности приведена совместно с исходной кривой, полученной экспериментально (верхняя часть рисунка).

И, наконец, задачей следующего модельного эксперимента являлось вычисление интегральных сумм вида

$$\delta_j^{***} |_1^N = \sum_{j=j-M/2}^{j+M/2} \delta_j(\Phi) + \sum_{j=N/4+j-M/2}^{N/4+j+M/2} \delta_j(\Phi) + \sum_{j=N/2+j-M/2}^{N/2+j+M/2} \delta_j(\Phi) + \sum_{j=3N/4+j-M/2}^{3N/4+j+M/2} \delta_j(\Phi), \quad (5)$$

характеризующих угловую погрешность положения каждого штриха измерительного растра, модифицированную с учетом действия четырех индикаторных растров.

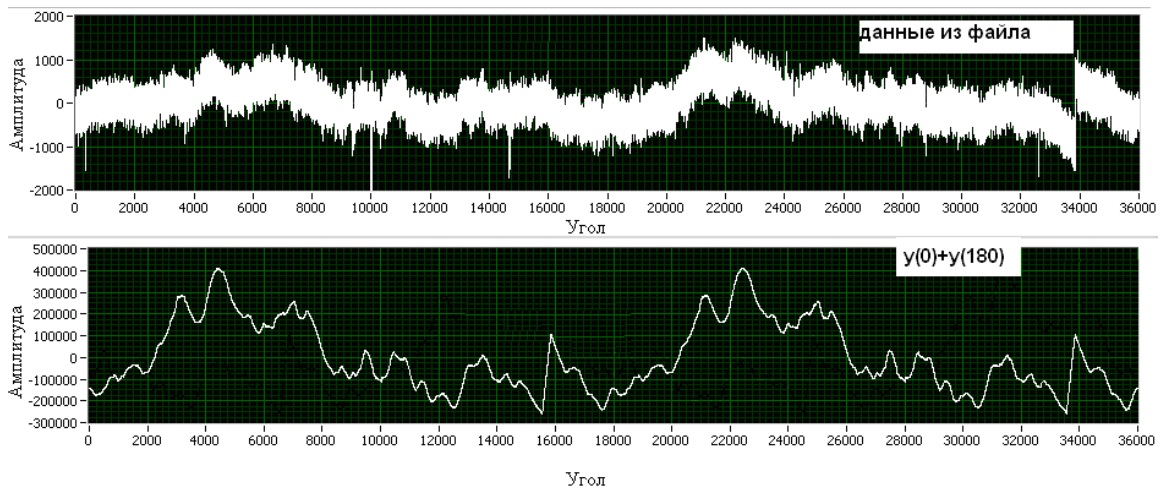


Рис. 3. Сравнение графиков угловой погрешности растра и преобразователя с двумя считывающими головками

В выражении (5) первое слагаемое определяет вклад индикаторного растра, расположенного на позиции 0° , а второе – его расположение на позиции 90° , третье – на позиции 180° и четвертое – на позиции 270° .

На рис. 4 приведен график ожидаемой погрешности углового преобразователя, рассчитанный в соответствии с (5).

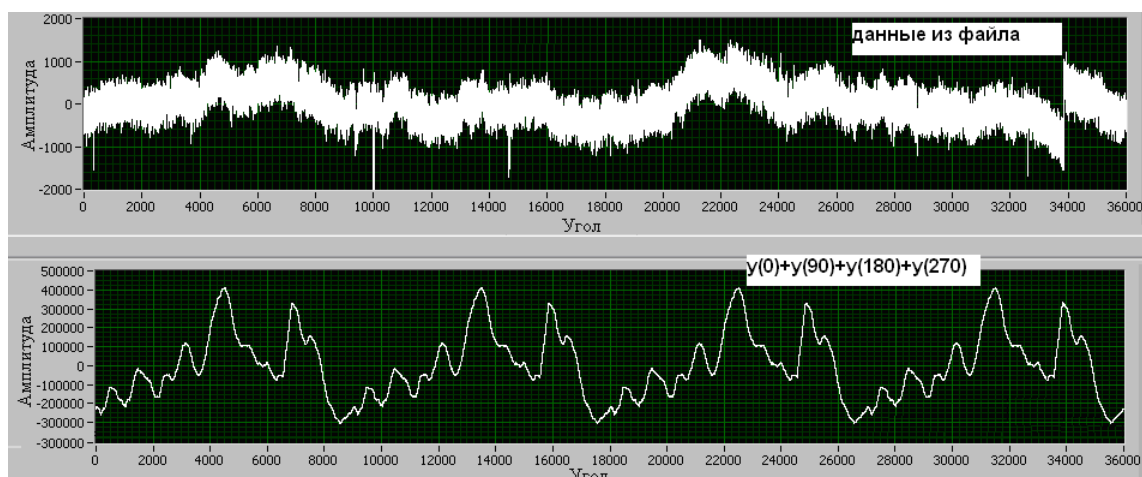


Рис. 4. Сравнение графиков угловой погрешности растра и преобразователя с четырьмя считывающими головками

Анализ результатов моделирования инструментальной погрешности углового преобразователя, обусловленной неточностью изготовления растра

Сравнивая результаты расчета ожидаемой погрешности углового преобразователя между собой и с исходной кривой погрешности измерительного растра, можно сделать следующие выводы.

В случае одноголовочного варианта преобразователя растровое сопряжение проявляет явно выраженные свойства интегрирующего звена. Поэтому на результирующей кривой погрешности преобразования локальные дефекты изготовления топологии растра проявляют себя в сглаженном виде; в среднем график инструментальной составляющей погрешности преобразователя повторяет особенности кривой погрешности самого измерительного растра.

Наличие двух или четырех считывающих головок в угловом преобразователе достаточно сильно трансформирует форму кривой погрешности преобразователя относительно исходной формы кривой погрешности изготовления измерительного растра: на результирующем графике локальные дефекты растра удваиваются или учетверяются.

Результат моделирования, полученный для случая использования в преобразователе четырех считывающих головок, сравнивался с результатом измерения с высоким разрешением погрешности реального углового преобразователя и использующего измерительный растр с дефектом, подобный тому, что имел место в модельных экспериментах. Для этого был взят конкретный преобразователь модели ROD 800, имеющий серийный номер 1978300В [2]. В отличие от анализируемого выше образца растра в этом преобразователе используется растр с 18 000 штрихами. По аналогии с предыдущим разделом кривые, характеризующие оба результата, на рис. 5 приведены совместно.

Безусловно, формы обеих кривых индивидуальны и имеют характерные отличия между собой. И этому можно дать вполне правдоподобное объяснение, например, состоящее в том, что в основе сравниваемых результатов лежат физически разные измерительные растры. Но, несмотря на это, результат моделирования обладает всеми особенностями, характерными для экспериментально полученной кривой погрешности преобразователя данного класса, а именно:

- наличие на обоих графиках явно выраженных четырех повторяющихся областей и горбов;
- наличие характерного учетверения локального дефекта, имеющегося на обоих измерительных растрах и проявляющегося в виде линейно спадающего участка (проинтегрирован-

ного в пространстве разрыва непрерывности исходных кривых погрешности раstra). На рис. 5 это точки с координатами 45° , 135° , 225° и 315° .

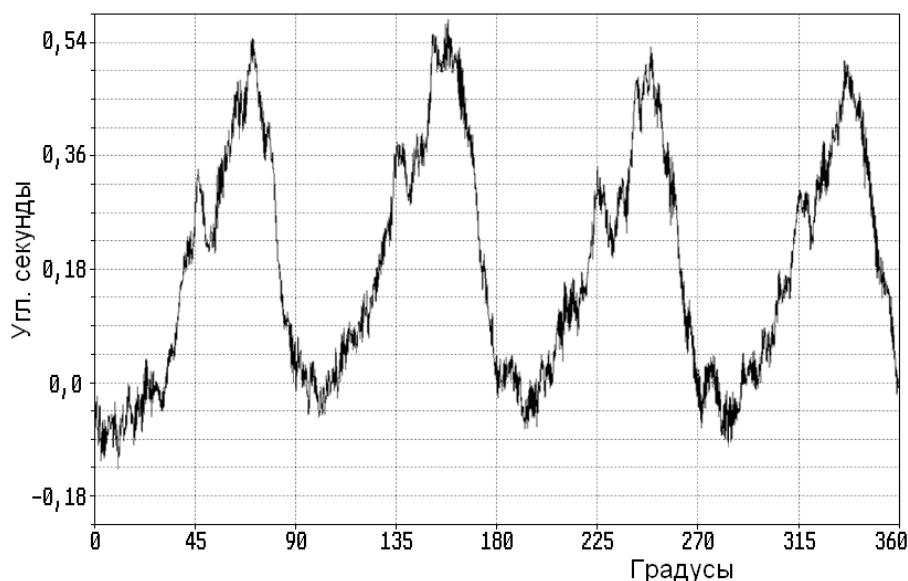


Рис. 5. Экспериментальная кривая, полученная для преобразователя ROD 800 с серийным номером 1978300 В

Поэтому можно считать, что моделирование инструментальной погрешности угловых преобразователей, обусловленной неточностью изготовления измерительного раstra, по схеме вычисления простого скользящего среднего позволяет получить результат, адекватно отражающий результат использования конкретного измерительного раstra в угловом преобразователе той или иной конструкции.

Заключение

Результат моделирования инструментальной погрешности углового преобразователя, обусловленной неточностью изготовления раstra, подтверждает ранее сделанное предположение о том, что компенсация погрешности изготовления измерительных растров, применяемых в угловых преобразователях комбинированного типа, будет наиболее полной, если данные о погрешности изготовления используемых измерительных растров будут предварительно модифицированы, например, по схеме вычисления простого скользящего среднего, позволяющего достаточно просто учесть влияние характеристик индикаторного раstra, применяемого в этих преобразователях.

Список литературы

1. Кирьянов В. П., Кирьянов А. В. Повышение точности угловых измерений с помощью фотоэлектрических преобразователей комбинированного типа // *Автометрия*. 2012. Т. 48, № 6. С. 84–91.
2. Кирьянов В. П., Кирьянов А. В., Лубков А. А., Чуканов В. В. Тонкая структура кривой погрешности углового преобразователя // *Науч. вестн. НГТУ*. 2013. Т. 52, № 3. С. 51–54.
3. 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. Т. 74, № 12. С. 40–49.
4. Angular encoders: General Catalog. Traunreut, Germany: Heidenhain GmbH, 2000. 82 p.

5. Борзов С. М., Узилев С. Б. Разработка многокадрового алгоритма подавления шума для мобильных тепловизионных систем наблюдения // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Информационные технологии. 2013. Т. 11, вып. 1. С. 16–23.

Материал поступил в редколлегию 30.04.2015

**V. P. Kiryanov¹, V. E. Zyubin^{1,2}, A. V. Kiryanov¹
A. A. Lubkov¹, A. S. Maksimov²**

¹ Institute of Automation and Electrometry SB RAS
1 Acad. Koptug Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

² Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

kiryanov@iae.nsk.su, zyubin@iae.nsk.su
alexey@iae.nsk.su, lubkov@iae.nsk.su, onixbed@gmail.com

SIMULATION OF AN INSTRUMENTAL ERROR OF HYBRID PHOTOELECTRIC CONVERTER DUE TO AN INACCURACY MANUFACTURE OF A RASTER

Simulation of the instrumental error of the hybrid photoelectric converter due to inaccuracy manufacture of a raster is made. Received confirmation of the thesis that when compensating the instrumental error in this converters of data on the accuracy of the raster to be used in a modified form, taking into account the parameters of the indicator raster used in it.

Keywords: photoelectric combined encoder, instrumental error, computational modeling, methods to improve the accuracy.

References

1. Kiryanov V. P., Kiryanov A. V. Increasing of accuracy of angular measurements by using hybrid photoelectric converters. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, November 2012, vol. 48, iss. 6, p. 605–611.
2. Tonkaya struktura krivoi pogreshnosti uglovogo preobrazovatelya [Fine error structure angle encoder]. *Science bulletin of Novosibirskstate technical university*, 2013, iss. 52, no. 3, p. 51–54.
3. Kiryanov V. P., Kiryanov A. V., Kruchinin D. Yu., Yakovlev O. B. Analysis of modern technologies for synthesizing goniometric structures for high-accuracy angle measurements (Analytical review). *Journal of Optical Technology*, vol. 74, iss. 12, p. 823–830.
4. Angular encoders: General Catalog. Traunreut, Germany: Heidenhain GmbH, 2000. 82 p.
5. Borzov S. M., Uzilov S. B. Development of multiframe noise reduction algorithm for mobile thermalvision systems. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2013, vol. 11, no. 1, p. 16–23. (in Russ.)