

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСТРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ПРИВОДАХ СКАНИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

С.В. Буренков, С.В. Медушев, В.Е. Ремизов, В.В. Шичков

*Представлены результаты расчётных и экспериментальных исследований метрологических характеристик (погрешностей) преобразователей угловых перемещений с использованием растровых лимбов-модуляторов в качестве прецизионных угловых мер в датчиках (энкодерах) инкрементального (инкрементного) типа в следящих приводах сканирующих устройств для стабилизации скоростей вращения сканирующих элементов (например, оптических зеркал) в наблюдательных и исследовательских системах КА. Дан подробный анализ предельных случайных погрешностей растровых преобразователей угловых перемещений с диаметральной переносом изображения штрихов лимба-модулятора с помощью гибкого волоконно-оптического жгута с учётом предельных составляющих ошибок обтюраторного сопряжения. Приведены формулы предельных составляющих погрешностей, обусловленных конструкторскими и технологическими допусками на изготовление, сборку и юстировку элементов и датчика в целом. Даны формула суммарной случайной погрешности с учётом основных составляющих погрешностей и её расчётное значение для такого типа датчика в составе приводов ПМСУ-ИК-СРМ для КА «Канопус-В-ИК» и результаты экспериментальных исследований, которые подтвердили возможность использования для проектной оценки предельной погрешности датчика приведённых расчётных формул.*

**Ключевые слова:** привод сканирующий, космический аппарат, преобразователь угловых перемещений, датчик-энкодер, лимб-модулятор растровый, волоконно-оптический жгут, перенос изображения, погрешность угловая предельная, погрешность расчётная, погрешность экспериментальная.

Известные [1, 2] преимущества растровых преобразователей (датчиков) угловых перемещений обеспечивают им широкое применение в различных областях промышленного производства (приборостроении и машиностроении). Практически во всех промышленно развитых странах, включая Россию, успешно работают многие фирмы-производители (например, СКБ ИС, г. С.-Петербург), серийно изготавливающие большой ассортимент моделей растровых преобразователей (энкодеров) промышленного назначения.

Однако датчики промышленного назначения практически трудно использовать в изделиях космической техники в силу известных специальных требований к устройствам КА в части механических нагрузок, воздействия спецфакторов, массогабаритных параметров, надёжности и ресурса работы. Поэтому, с учётом таких требований, в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» разработаны несколько типов растровых датчиков угловых перемещений, встроенных в конструкцию специализированных приводов сканирующих устройств КА.

В данной статье представлены результаты расчётных и экспериментальных исследований метрологических характеристик (погрешностей) фотоэлектрических преобразователей угловых перемещений с использованием растровых лимбов-модуляторов, в качестве прецизионных угловых мер в датчиках (энкодерах) инкрементального (инкрементного) типа, в следящих приводах сканирующих устройств для стабилизации скоростей вра-

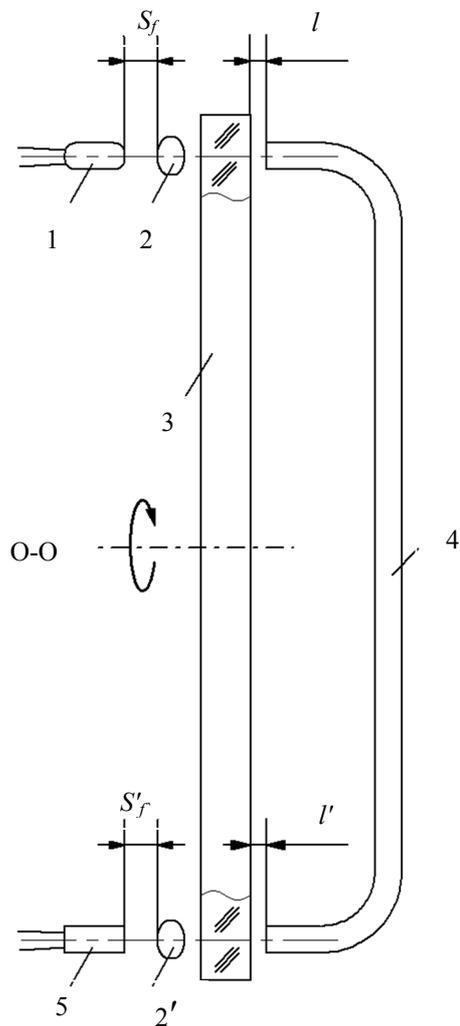
щения сканирующих элементов (например, оптических зеркал) в наблюдательных и исследовательских системах КА.

Достаточно подробный расчётный анализ погрешностей фотоэлектрических растровых преобразователей, построенных по обычной оптической схеме с вращающимся измерительным лимбом и неподвижным индикаторным лимбом и двумя оптопарами, диаметрально расположенными относительно оси вращения, приведён в статье [3]. Там же указано, что для компенсации одной из основных угловых погрешностей, возникающей вследствие эксцентриситета штриховой измерительной дорожки вращающегося лимба относительно оси вращения, следует использовать в оптической схеме преобразователя метод переноса изображения штрихов участка измерительного лимба на диаметрально противоположную сторону лимба. В этом случае материальные штрихи лимба и перенесённые изображения штрихов будут двигаться навстречу друг другу, обеспечивая обтюраторное сопряжение при вращении измерительного лимба и, соответственно, синусоидальную модуляцию светового потока.

Такой перенос изображения можно осуществить с помощью гибкого волоконно-оптического жгута (ВОЖ) с регулярной укладкой волокон с линейным увеличением изображения штрихов  $V = 1x$ ; при этом разрешение и чувствительность датчика увеличиваются в два раза по сравнению с обычной схемой обтюраторного сопряжения.

Другой способ переноса изображения с использованием призменно-линзовой проекционной системы, позволяющий увеличить разрешение и чувствительность преобразователя в несколько раз, но с соответствующим уменьшением глубины модуляции выходных сигналов датчика, предложен в [4].

Для практической реализации варианта оптической схемы с переносом изображения в преобразователях угловых перемещений (конкретно, для стабилизации скоростей вращения сканирующих зеркал) нами был выбран вариант переноса изображения с помощью ВОЖ, поскольку он представляется нам конструктивно-технологически наиболее простым. Оптическая схема такого варианта датчика представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема оптическая датчика с ВОЖ: 1 – излучающий диод (сд); 2, 2' – линзы-конденсоры; 3 – растровый лимб (модулятор); 4 – ВОЖ; 5 – фотодиод (фд);  $S_f, S'_f$  – передний и задний фокальные отрезки линз;  $l, l'$  – конструктивные зазоры; О-О – ось вращения

Для минимизации фазовой погрешности синусоидальных выходных сигналов соотношение сигнал/шум на выходе датчика должно соответствовать оптимальному значению. Это достигается соответствующим подбором оптипары (сд + фд) по их светоэнергетическим и спектральным характеристикам и достаточной глубиной модуляции выходного сигнала, зависящей от характера (контраста) обтюраторного сопряжения растрового датчика. Несложно показать, что при относительно широких штрихах раstra и шаге раstra ( $d > 0,1$  мм), дифракционным уширением штрихов можно пренебречь. Таким образом, контраст в распределении освещённости на входном (выходном) торце ВОЖ будет определяться геометрическим расхождением коллимированного светового пучка, проходящего через штриховую дорожку лимба. Контраст будет близок к нулю, если зазоры  $l$  и  $l'$  между штриховой дорожкой на лимбе 3 и торцами ВОЖ соответствует:

$$l = l' \geq \frac{df}{s},$$

где  $d$  – шаг растровой дорожки лимба;  $f$  – фокусное расстояние линзы 2;  $s$  – размер излучающей области сд.

Соответственно, для увеличения (до 0,9) глубины модуляции выходного синусоидального сигнала в линейном приближении зазоры должны быть:

$$l = l' \leq 0,1 \frac{df}{2s}.$$

Поскольку угловой мерой растрового преобразователя угловых перемещений является растровый лимб-модулятор, то погрешности его изготовления (систематические и случайные) будут в значительной мере определять и суммарную угловую погрешность такого датчика. Другими факторами, влияющими на общую погрешность датчика, являются допуски на изготовление деталей, сборку и юстировку механической части датчика. Таким образом, суммарная (общая) случайная угловая погрешность растрового датчика будет складываться из случайной угловой погрешности  $\delta\alpha_H$  штрихов лимба в пределах световых (освещённых) зон на штриховой дорожке лимба; накопленной угловой погрешности штрихов лимба в пределах  $180^\circ \delta\alpha_H$  случайных угловых погрешностей сборки и юстировки элементов датчика вследствие эксцентриситета среднего диаметра штриховой дорожки лимба относительно оси вращения  $\delta\alpha_3$ ; не-

равенства радиусов оптических осей торцов ВОЖ относительно центра средней окружности штриховой дорожки лимба  $\delta\alpha_{\Delta R}$ ; торцевого биения штриховой дорожки лимба  $\delta\alpha_T$ ; наклона изображения штрихов относительно материальных штрихов лимба при переносе изображения  $\delta\alpha_K$ .

Определим зависимости предельных значений указанных погрешностей.

Случайная фазовая погрешность выходного сигнала, обусловленная средней квадратичной погрешностью при доверительной вероятности 0,95 единичного измерительного импульса:

$$\delta\alpha_{II} = 2\sigma_{II} = \frac{4\Delta d\sqrt{z_{\text{Э}}}}{D_{II}z_{\text{Э}}}, \quad (1)$$

где  $\Delta d$  – разноразмерность ширины штрихов (шага) растровой дорожки;  $D_{II}$  – средний диаметр дорожки;  $z_{\text{Э}}$  – эффективное число штрихов лимба, суммируемое в световой зоне ВОЖ при формировании единичного измерительного импульса:

$$z_{\text{Э}} = \frac{\sqrt{\pi}D_B}{2d},$$

где  $D_B$  – световой диаметр торца ВОЖ.

Величина (амплитуда) некомпенсированной фазовой погрешности вследствие эксцентриситета  $\varepsilon_M$  лимба-модулятора, остающегося после юстировки датчика, определяется известным [3] выражением:

$$\delta\alpha_{\text{Э}} = 4 \frac{\varepsilon_M^2}{D_B^2}. \quad (2)$$

Дополнительная ошибка вследствие неравенства (в диаметральной плоскости) радиусов расположения осей световых торцов ВОЖ относительно центра средней окружности штриховой дорожки лимба тоже определяется известным выражением:

$$\delta\alpha_{\Delta R} = \varepsilon_M \frac{\Delta R}{R_1 R_2}. \quad (3)$$

При отклонении  $\Delta p$  оси одного из торцов ВОЖ от строго диаметральной плоскости также появляется дополнительная ошибка с амплитудой:

$$\delta\alpha_{\Delta p} = 2\varepsilon_M \frac{\Delta p}{R^2}. \quad (4)$$

В работе [3] показано, что ошибка  $\delta\alpha_T$  от торцевого биения штриховой дорожки лимба весьма невелика по сравнению с вышеуказанными угло-

выми погрешностями и её можно не учитывать при торцевом биении не более 0,1 мм.

Влияние муарового сопряжения (комбинационных полос) на фазовую погрешность датчика практически можно исключить, если при юстировке датчика обеспечить параллельность изображения штрихов раstra относительно материальных (сопрягаемых) штрихов путём несложного поворота вокруг оптической оси одного из торцов ВОЖ.

Таким образом, суммарную угловую погрешность измерительных импульсов, формируемых растровым датчиком углового положения вала с переносом изображения штрихов радиального лимба в диаметральной плоскости с помощью ВОЖ, можно оценить следующим выражением:

$$\Sigma\delta\alpha'_{II} = \sqrt{\delta\alpha_{II}^2 + \delta\alpha_H^2 + \delta\alpha_{\text{Э}}^2 + \delta\alpha_{\Delta R}^2 + \delta\alpha_{\Delta p}^2} \quad (5)$$

с учётом формул (1) – (4).

Были проведены экспериментальные исследования погрешностей такого типа датчиков в составе приводов ПМСУ-ИК-СРМ для КА «КАНОПУС-В-ИК». В датчиках используются растровые лимбы-модуляторы со следующими характеристиками:

- число штрихов (прозрачных и непрозрачных)  $Z_{\text{л}}=1600$ ;
- средний диаметр штриховой дорожки  $D_{II}=70$  мм;
- линейная ширина штрихов (на среднем диаметре)  $d/2=0,0687$  мм;
- разноразмерность ширины штрихов (шага раstra)  $\Delta d \leq 0,001$  мм;
- накопленная угловая погрешность осей штрихов на  $360^\circ$   $2\Delta\alpha_H \leq 6$  угл. с;
- несоосность среднего диаметра штриховой дорожки и юстировочного кольца (шириной 0,03 мм)  $\leq 0,005$  мм.

Кроме того, были обеспечены следующие конструктивные параметры и допуски:

- световой диаметр торцов ВОЖ  $D_B = 3$  мм;
- неравенство радиусов размещения осей торцов ВОЖ  $\Delta R \leq 0,3$  мм;
- эксцентриситет модулятора после юстировки:  $\varepsilon_M \leq 0,02$  мм.

Расчётное значение предельной случайной погрешности, вычисленное по формуле (8), составило  $\approx 4,8$  угл. с.

Экспериментальное исследование зависимости глубины модуляции от угла сопряжения между материальными штрихами и их изображением путём поворота одного из торцов ВОЖ вокруг своей оси (при этом зазоры  $l$  и  $l'$  были минимальны и составляли примерно 0,15 мм) показано на рис. 2, где  $\theta$  – угол поворота торца ВОЖ, в град;  $M$  – глубина модуляции. Следует отметить, что при углах обтюраторного сопряжения штрихов  $\theta \leq \pm 2^\circ$  влиянием муаровых (комбинационных) полос на фазовую погрешность можно пренебречь с учётом снижения глубины модуляции.

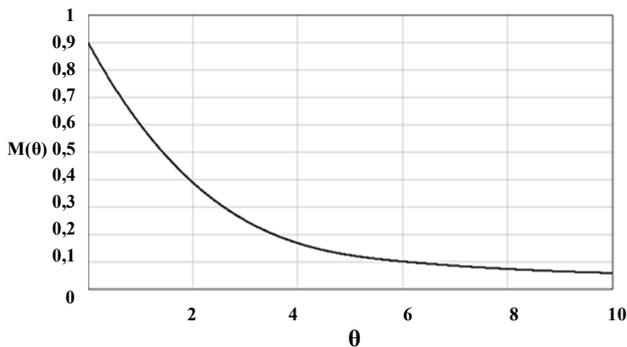


Рис. 2. Зависимость амплитуды модуляции от угла поворота изображения штрихов

Экспериментальное исследование фазовых погрешностей растрового датчика в составе сканирующих приводов показано в виде осциллограммы на рис. 3, на которой угловая ошибка представлена в аналоговом виде с масштабом 1 В = 10 угл. с. На фоне низкочастотных колебаний угловой ошибки, вызванных работой системы управления, наглядно видны периодические колебания с частотой около 204 Гц, что соответствует частоте следования штрихов раstra при номинальной угловой скорости вращения вала растрового датчика.

Поступила в редакцию 10.07.2016.

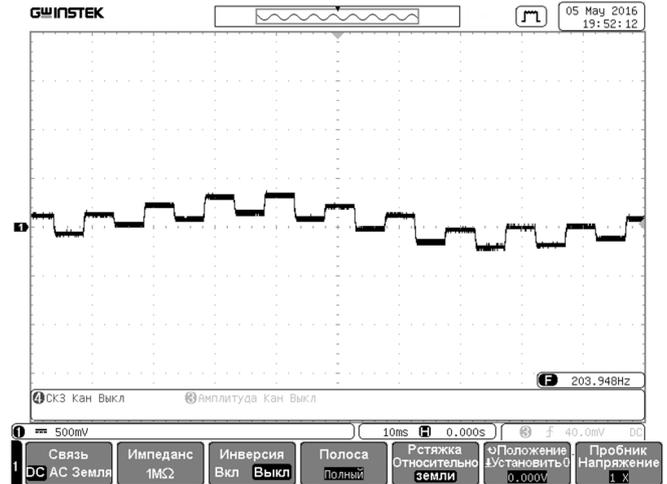


Рис. 3. Осциллограмма с выходным сигналом сканирующего привода. Измеренное по осциллограмме значение фазовой погрешности растрового датчика составляет около 2 угл. с, что более чем в два раза ниже предельно допустимой расчётной величины

Таким образом, для оценки предельных погрешностей сканирующих приводов с растровыми датчиками углового положения вала можно использовать расчётную формулу (5) с учётом указанных составляющих фазовых погрешностей.

### Литература

1. Фотоэлектрические преобразователи информации / Под ред. Л. Н. Преснухина. – М. : Машиностроение, 1974.
2. Высокоточные угловые измерения / под ред. Ю. Г. Якушеникова. – М. : Машиностроение, 1987.
3. Горжевский И. И., Иванов А. А., Маликов Ю. П. Фазовая погрешность фотоэлектрического преобразователя на растровых диска // Труды ВНИИЭМ. Прецизионные электромеханические устройства. – М., 1985. – Т. 78.
4. Способ измерения перемещений и устройство для его осуществления / И. А. Вевурко, В. А. Заигрин, И. В. Ракитянский, В. В. Шичков. Патент 3553061/25-28; заявл. 10.02.1982; опубл. 15.09.1984. Бюл. № 34.

**Сергей Валерьевич Буренков**, инженер, т. (916) 369-94-69.

**Сергей Валентинович Медушев**, начальник отдела.

**Валерий Евгеньевич Ремизов**, главный специалист, т. (977) 806-89-82.

**Виктор Васильевич Шичков**, канд. техн. наук, начальник лаборатории, т. (926) 831-67-80.

E-mail: vvmastera@mail.ru.

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

## RESEARCH of METROLOGICAL CHARACTERISTICS SPECIFIED for PHOTOELECTRIC RASTER ANGULAR TRANSDUCERS of SPACECRAFT SCANNERS DRIVES

S.V. Burenkov, S.V. Medushev, V.E. Remizov, V.V. Shichkov

*The article represents results of calculations and evaluation of metrological characteristics (errors) of raster angular transducers, using raster graduated circles-modulators as precision angle gauge in incremental sensors (encoders) of scanners drives for stabilizing rotation rate of scanning elements (e.g., optical mirrors) used within SC observation and research systems. The article gives a detailed analysis of limiting random errors (including limiting error components of obturator interface) of raster angle transducers with diametric transfer of limb graduation lines picture using a flexible fiber-optic cable. Formulas of limiting component errors caused by manufacturing, assembly and adjusting tolerances, specified in design and engineering documents for elements, as well as for the entire sensor, are given. Formula for calculation of accumulated random error, including basic component errors, as well as the value calculated for such type of sensor being a part of ПМСУ-ИК-СРМ drives has been given for Kanopus-V-ИК Satellite. In the article, experimental results have also been presented confirming that offered calculating formulas can be used for evaluation of sensor limiting error with respect to design specification.*

**Key words:** scanning drive, Spacecraft, angular transducer, sensor-encoder, modulating raster graduated circle, fiber-optic cable, image transfer, limiting angular error, calculated error, experimental accuracy.

### List of References

1. Photoelectric data converter / Under the editorship of L. N. Presnukhina. – M. : Mashinostroenie [Machine Building Publ.], 1974.
2. High-precision angle measurements / Under the editorship of Iu. G. Iakushenkova. – M. : Mashinostroenie [Machine Building Publ.], 1974.
3. Gorzhevskii I. I., Ivanov A. A., Malikov Iu. P., Phase error of photoelectric converter build using raster discs // VNIIEМ Works. Precision electromechanical devices. – M., 1985. – Vol. 78.
4. Technique for measuring of displacements and special measuring device designed for it / I. A. Vevirko, V. A. Zaigrin, I. V. Rakitianskii, V. V. Shichkov. Patent 3553061/25-28; application dated 10.02.1982; date of publication: September 15, 1984. Bulletin No. 34.

*Sergei Valerievich Burenkov, Engineer, tel. (916) 369-94-69.*

*Sergei Valentinovich Medushev, Head of Department.*

*Valerii Evgenievich Remizov, Leading Specialist, tel. (977) 806-89-82.*

*Viktor Vasilievich Shichkov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.),  
Head of Laboratory, tel. (926) 831-67-80.*

*E-mail: vmanstera@mail.ru.*

*(JC «VNIIEМ Corporation»).*