

**НАУКОВІ ТА ПРАКТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА  
ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ**

УДК 531.383

**АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
АВТОКОЛЛИМАТОРОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ УГЛОВ**

*Безвесильная Е.Н., Гнатейко Н.В., Штефан Н.И.*

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
г.Киев, Украина*

*В статье рассматриваются возможные погрешности измерения углов щелевым, фотоэлектрических автоколлиматором от различных факторов и предлагаются методы их расчета для последующего учета в результатах измерения, что повышает точность операции. При этом можно использовать для измерения погрешностей такого автоколлиматора обычную, простую призму вместо дорогостоящего интерферометра, а погрешность определяется непосредственно в угловых единицах измерения.*

**Ключевые слова:** погрешности измерения углов, фотоэлектрический автоколлиматор.

**Введение**

При точном измерении углов в технике часто используются измерительные системы, которые основаны на применении щелевых фотоэлектрических автоколлиматоров (ЩФА), излучающих и принимающих отражение световых лучей от объекта измерения [1]. От точности исполнения оптической системы такого прибора зависит точность измерения угловых величин, что иногда не вкладываются в допустимые рамки требований к данной процедуре.

При изготовлении таких автоколлиматоров возникают технологические погрешности в виде угловых или линейных аберраций из-за смещений основных, рабочих их элементов относительно оптической оси системы прибора. Также влияют на точность работы ЩФА погрешности установки как самого многолинзового объектива, так и других элементов прибора относительно его основной визирной оси оптической системы, искажающих светопередачу.

На точность такого измерения углов влияют также ошибки от смещений проверочной многогранной, инструментальной призмы при установке и закреплении её на поворотном столике системы.

**Постановка задачи**

Перечисленные выше погрешности приведут до того, что характеристики воспринимаемых отраженных лучей от объекта измерения будут различными по световому диаметру основного рабочего органа ЩФА – объектива, что вызывает ошибки измерения углов.

Изучение и определение величины таких ошибок, которые зачастую являются систематическими постоянными для каждого прибора индивидуально, позволяет учесть их при получении результата измерения угла и тем самым повысить

силь достоверность данного процесса.

### **Определение ошибок измерения углов фотоэлектрическим автоколлиматором.**

При анализе точности процедуры измерения углов таким прибором необходимо знать причину появления и величину составляющих общей погрешности измерения, определить наиболее весомые из них в этой общей ошибке полученного результата. Это позволит учесть их при измерении и путем компенсации повысить точность операции, упростить процесс точной установки измерительной призмы на поворотном столике прибора и значительно сократить время проведения данной операции измерения углов.

Проведем анализ влияния величины погрешности, обусловленной смещением оси призмы относительно оси вращения измерительного столика системы, на точность измерения углов. Схематично графически представим такую погрешность от смещения призмы с оси и её дрейфа, относительно объектива ЩФА при поворотах столика на угловой шаг призмы (рис. 1).

На схеме схематично изображены: линией 2 объектив ЩФА и линией 3 его фокальная плоскость проецирования. Точка  $O$  представляет общую фокальную точку этого объектива. Линиями 1 изображены зеркально отражающие грани измеряемой призмы в разных её позициях.

Вначале представим случай наличия идеальных оптических линз объектива, их юстировки и всего прибора. Тогда излучение светопотока на выходе будет проходить параллельно оптической оси  $OO'$ . Отразившись от грани 1 призмы, в случае её установки перпендикулярно оси  $OO'$ , луч 4 излучения вернется обратно в фокальную точку  $O$ . В этом случае при смещении призмы погрешность измерения угла равна нулю.

В реальном случае при не параллельности излучения оси  $OO'$ , на примере лучей 4а и 4б, они отразятся от граней 1а и 1б и попадут соответственно на фокальную плоскость 3в точки  $A$  и  $B$ . Для устранения такой погрешности измерения от рассогласования  $A$  и  $B$  с точкой  $O$  надо, чтобы они вернулись в точку  $O$ . Для этого необходимо грани призмы 1а и 1б повернуть на углы  $(+\alpha)$  и  $(-\alpha)$  соответственно, что показано на схеме пунктиром. Это самое необходимо проделать с призмой, повернуть её на  $(+\alpha)$ , при значительном расхождении излучения луча 4в.

Таким образом, такие необходимые повороты призмы на углы  $\alpha$  отражают собой погрешности измерения углов призмы обусловленные «расхождением» излучения ЩФА относительно оптической оси системы  $OO'$  при смещении грани призмы относительно светового диаметра объектива автоколлиматора при её установке на предметном столике.

Определим такую погрешность измерения угла  $\Delta\varphi$  на основе схемы (рис. 2), где геометрический центр  $A$  измеряемой призмы  $B$ , с гранями 1, 2, ..., 6, смещен с оси вращения  $O$  предметного столика  $C$  на величину  $OA=h$ . При первой позиции призмы, повернутой к объективу  $D$  автоколлиматора первой гранью, отра-

женный от неё луч света попадает на объектив а точку *a*.

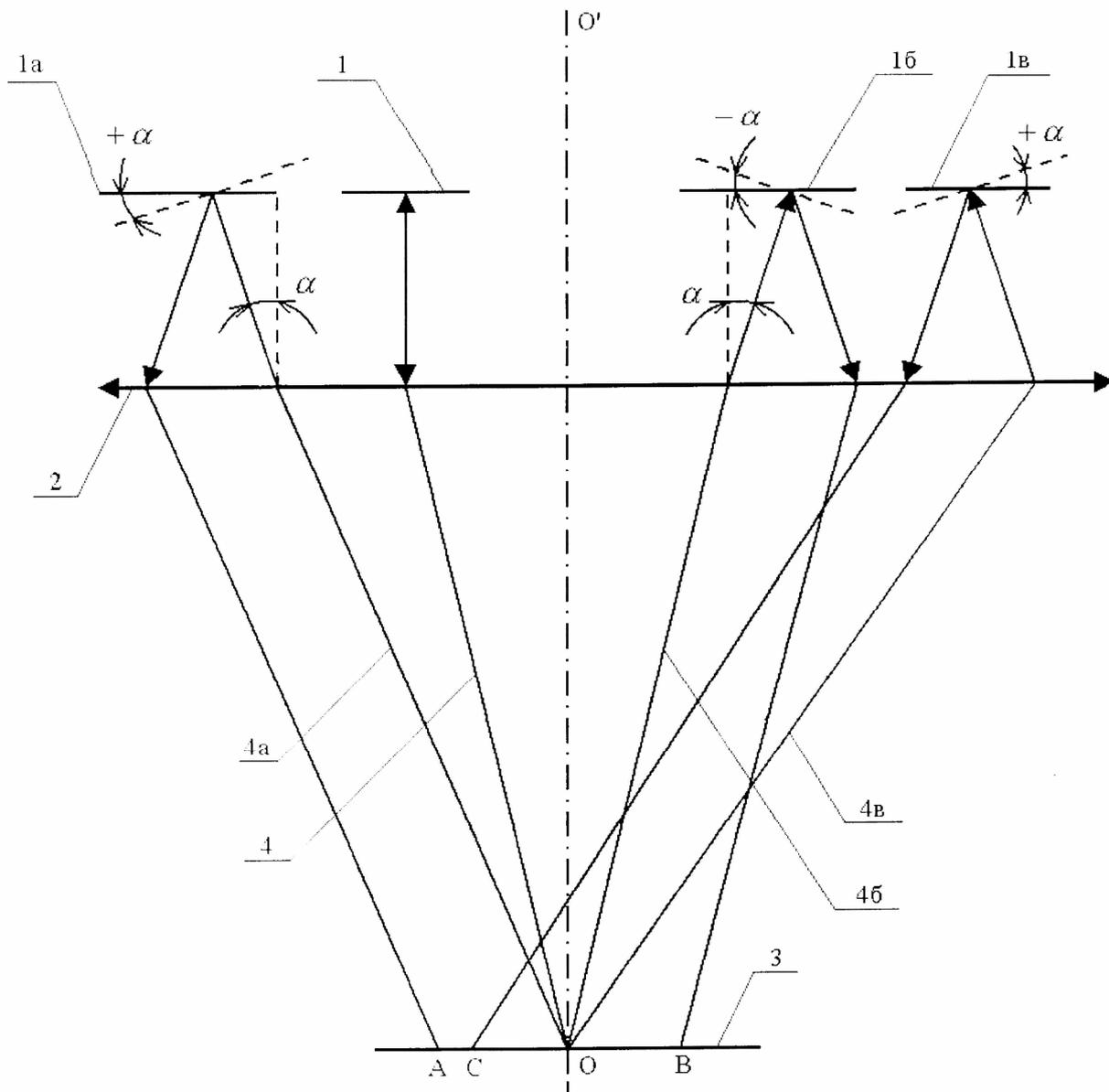


Рис. 1. Объектив автоколлиматора.

Расстояние от её визирной оси  $OO'$  прибора, с учетом величины смещения  $h$  от центра вращения столбика и углом наклона  $\alpha_0$  к оси  $Y$ , которая перпендикулярна оси  $OO'$ , можно определить по:

$$Oa = h \cos \alpha_0. \quad (1)$$

При повороте столика  $C$  на вторую позицию на угловой шаг  $OC$  призмы, она займет положение  $B'$ , обозначенное на схеме штрихами. Перпендикулярно излучению ЩФА будет расположена грань призмы 2, а центр отраженного луча света от призмы займет положение в точке  $a'$ , на объективе прибора  $D$ . Тогда величина смещения отраженного луча  $aa'$ , при этом по объективу прибора будет равняться:

$$aa' = h(\cos \alpha_0 - \cos(\alpha_0 + \alpha)). \quad (2)$$

При поворотах призмы на следующие позиции измерения на угловой шаг  $\alpha$  отраженный от призмы луч света будет занимать разные положения на плоскости объектива  $D$ , величины которых  $h_i$  от оси  $OO'$  определяются выражением:

$$h_i = h(\cos \alpha_0 - \cos(\alpha_0 + i\alpha)), \quad (3)$$

где  $i$  – порядковый номер грани призмы ( $i=1,2 \dots 6$ ), как целое число.

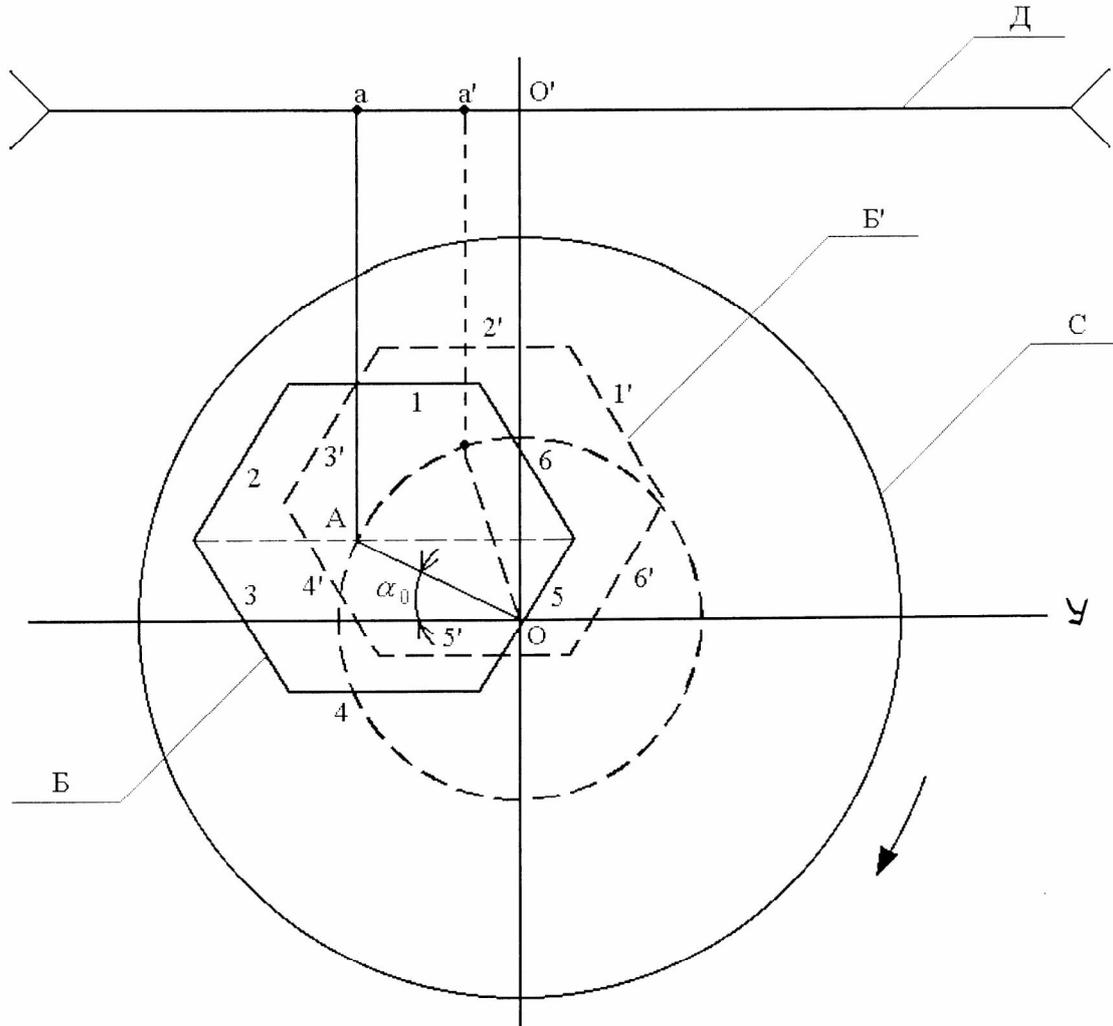


Рис.2. Схема измерений углов призмы.

Все эти расчеты относятся к идеальному случаю, когда автоколлиматор сделан без погрешностей. В реальных условиях из-за технологических погрешностей изготовления элементов объектива, наличия зазора между ним и корпусом автоколлиматора, погрешностей сборки всего прибора и его юстировки проявляется не параллельность его выходного излучения главной визирной оси коллиматора в виде малых углов отклонения луча света на угол  $\gamma$  от этой визирной оси. Это вызывает дополнительную погрешность измерения углов.

Тогда общая суммарная погрешность измерения углов  $\Delta\varphi_{\Sigma}(i\alpha)$  на призме будет функционально зависеть как от погрешности смещения призмы  $h$  на

предметном столике системы, так и от параллельности излучения светового луча ЩФА его визирной оси, что можно представить в виде:

$$\Delta\varphi_{\Sigma}(i\alpha) = f(\gamma;h) , \quad (4)$$

где  $f(\gamma;h)$  – общая функция погрешности измерения призмы.

Так как углы  $\gamma$  разбежности излучения с оптической осью прибора всегда обычно малы и находятся где-то в пределах нескольких угловых секунд, то полученная погрешность измерения углов призмы будет иметь вид:

$$\varphi_{\Sigma}(n\alpha) = \gamma h(\cos\alpha_0 - \cos(\alpha_0 + n\alpha)) , \quad (5)$$

где  $n$  – число граней на инструментальной призме.

На основании полученных математических значений ошибок измерения углов призмы были проведены расчеты возможных погрешностей измерений для разных поворотов призмы, которая имела  $n = 24$  граней. Результаты таких расчетов показаны на рис.3.

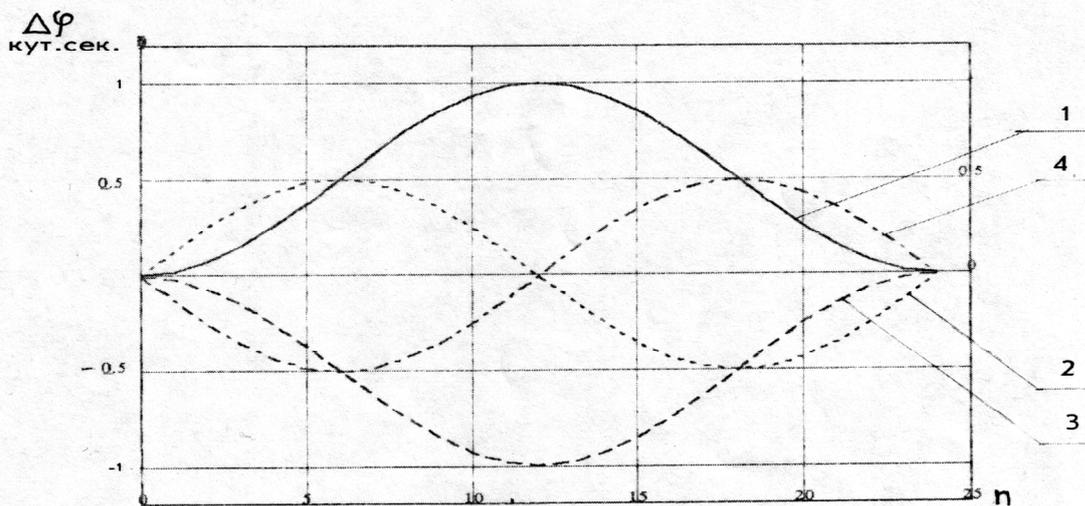


Рис.3. Погрешности измерений углов при смещении проверяемой призмы.

При этом принимались такие характеристики:

$\gamma=0,05$  угл. с/мм;  $h=10$  мм;  $n = 0,1,2\dots24$ .

Кривая 1 - при  $\alpha_0 = 0^\circ$ , кривая 2 - при  $\alpha_0 = 90^\circ$ , кривая 3 - при  $\alpha_0 = 180^\circ$ , кривая 4 - при  $\alpha_0 = 240^\circ$ .

Из схемы следует, что в зависимости от угла поворота призмы  $\alpha_0$  максимальная величина ошибки измерения угла может изменяться до двух раз. При этом было установлено, что с увеличением величины смещения призмы  $h$  значительно возрастают и  $\Delta\varphi_{\Sigma}$ .

Исследуем еще один метод оценивания точности измерения углов при замере погрешностей двумя способами с применением многогранной тонкой призмы.

Сущность метода в том, что проводят измерения углов одной и той же призмы два раза. При этом в первый раз, когда она устанавливается достаточно

точно ( $h \rightarrow 0$ ), а после этого проводится повторное измерение углов призмы при ранее заданном смещении её центра, как  $h = 10$  мм или 20 мм. Потом по разнице полученных результатов углов судят про непараллельность излучения автоколлиматора.

Математически это можно представить такой моделью:

$$\varphi_i = \varphi_{ih} - \varphi_{i0} = f_1(\gamma_{x,y}; \delta_{iz,k}; S_i; h_{ix,y}) - f_2(\gamma_{x,y}; \delta_{iz,k}; h_{i0}), \quad (6)$$

где  $\varphi_{ih}$  и  $\varphi_{i0}$  – величины полученных углов призмы с её смещением  $h$  и без смещения, когда  $h \rightarrow 0$ , соответственно;

$f_1$  и  $f_2$  – функции ошибок измерения углов со смещением призмы и без смещения с оси вращения столика;

$\gamma_{x,y}$  – угловая погрешность коллимации излучения ЩФА по световому диаметру его объектива по осям  $X$  и  $Y$ ;

$\delta_{iz,k}$  – величины отклонения от плоскости каждой грани изготовленной призмы по двум её осям  $z$  – вертикальной и к  $k$  – горизонтальной (из паспорта на призму);

$S_i$  – величина площади каждой грани призмы;

$h_{ix,y}$  и  $h_{i0}$  – величины смещений центров призм по осям  $X$  и  $Y$  при их наличии и возможно малое смещение этого центра при точной установке призмы соответственно.

Таким образом, оценить качество автоколлиматора возможно за счет определения погрешности работы только самого ЩФА.

### **Выводы**

Достоинство оценки качества фотоэлектрических автоколлиматоров предложенными методами заключается в том, что они позволяют точно оценить погрешности измерения углов от различных факторов процедуры измерения.

Преимущество рассмотренных и предложенных методов оценки качества измерений с помощью ЩФА и применением многогранной призмы заключается в следующем:

1. Возможно использовать для измерения погрешностей обычную широко применяемую простую призму вместо дорогостоящего оборудования в виде интерферометра и т. п.;
2. Предложенный последний метод оценки качества ЩФА позволяет исключить погрешности измерения неоптической части прибора, а позволяет оценить точность работы автоколлиматора в оптической его цепи;
3. Определяется погрешность работы ЩФА и процедуры измерения непосредственно в угловых единицах измерения.

В дальнейших исследованиях целесообразно, на основе предложенных в статье методов оценки качества измерения автоколлиматорами, провести дополнительные исследования по совершенствованию их результата и путем мо-

делирирования методик перевести это на компьютерное обеспечение.

#### **Литература**

1. О.М. Безвесільна, Н.В. Гнатейко. Автоматична система високоточного вимірювання кутів в динаміці /Механіка гіроскопічних систем, НТУУ «КПІ», вип. 20, -К: - 2009.- С. 78-80.
2. ГОСТ 2875-88. «Меры плоского угла призматические». – М.: Изд. стандартов, 1988. - 9 с.
3. ГОСТ 8.266-77. Гониометры. Методы и средства проверки. – М.: Изд. Стандартов, 1977. – С.1172
4. Filatov Yu.V., Loukianov D.P. and Probst R. Dynamic Angle Measurement by Means of Ring Laser, Metrologia. – 1997. - № 34. – p. 343-351.

#### **References**

1. Bezvesil'naya E.N., Gnateyko N.V., Automatic system of precision angle measurement in dynamics./ Gyroscopic system mechanics, NTUU "KPI", edition 20, -K:-2009.-p.p. 78-80. [ukr]
2. GOST 2875-88. "Measures of the plane angle prismatic". Edition of standards, 1988.-p. 9. [rus]
3. GOST 8.266-77. Goniometers. Methods and means of verification. Ed. Standards 1977.-p. 1172. [rus]
4. Filatov Yu.V., Loukianov D.P. and Probst R. Dynamic Angle Measurement by Means of Ring Laser, Metrologia. – 1997. - № 34. – p. 343-351.

**Е.Н. Безвесільна, Н.В. Гнатейко, Н.І. Штефан**

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
м. Київ, Україна*

#### **АНАЛІЗ ЯКОСТІ ФОТОЛЕКТРИЧНИХ АВТОКОЛІМАТОРІВ ПРИ ВИМІРЮВАННІ КУТІВ**

В статті розглядаються можливі похибки вимірювання кутів щільним фотоелектричним автоколіматором від різноманітних чинників і пропонуються методи їх розрахунку для подальшого урахування в результатах вимірювання, що підвищує точність операції. При цьому можливо використовувати для вимірювання похибок такого автоколіматору звичайну просту призму замість інтерферометра, який дорого коштує, а похибка вимірювання визначається безпосередньо в кутових одиницях вимірювання.

**Ключові слова:** похибки вимірювання кутів, фотоелектричний автоколіматор.

**E.N. Bezvesil'naya, N.V. Gnateyko, N.I. Shtefan**

*National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

#### **ANALYSIS OF QUALITY OF PHOTO-ELECTRIC AUTOCOLLIMATORS AT A GONIOMETRY**

The article considers possible measurement errors tight corners photoelectric autocollimator of various factors and their calculation methods proposed for further consideration in measuring results, increasing the accuracy of operation. For autocollimator error measurement usual simple prism can be used instead of interferometer, that cost a lot, and error measurement determined directly in angular units of measurement.

**Keywords:** measurement errors tight corners, photoelectric autocollimator.

*Надійшла до редакції  
28 березня 2011 року*