



Шишкин С. Б., Шишкин Б. В.  
S.B. Shishkin, B.V. Shishkin

**ПРОВЕРКА УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ПРИ СБОРОЧНЫХ ОПЕРАЦИЯХ**

**TESTING ANGLE MEASUREMENT EQUIPMENT DURING ASSEMBLY OPERATIONS**

**Шишкин Сергей Борисович** – магистр техники и технологии. E-mail: [usu@knastu.ru](mailto:usu@knastu.ru).  
**Mr.Sergey B. Shishkin** – Master of Engineering and Technology, [usu@knastu.ru](mailto:usu@knastu.ru)

**Шишкин Борис Васильевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [usu@knastu.ru](mailto:usu@knastu.ru).  
**Mr.Boris V.Shishkin** – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Chemical Production Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur).  
E-mail: [usu@knastu.ru](mailto:usu@knastu.ru)

**Аннотация.** В статье приводится математическая модель систематической погрешности углоизмерительного оборудования типа «TPS System-призма». Математическая модель поведения погрешности проверена на экспериментальной установке.

**Summary.** The paper proposes a mathematical model of systematic error of “TPS System-Prism” type angle measurement equipment. This mathematical model of error behaviour has been tested at an experimental installation.

**Ключевые слова:** углоизмерительное оборудование, эксцентриситет, несоосность.

**Keywords:** angle measurement equipment, eccentricity, misalignment.

УДК 53.089

Погрешность измерительной системы приводит к снижению точности углоизмерительного оборудования типа «TPS System-призма». Разработка математической модели для минимизации систематических погрешностей для горизонтальных угловых перемещений является целью данной работы.

При проведении измерительных опытов основными источниками возникновения погрешности измерения являются:

1. Погрешность установки горизонтального угла при помощи двадцатичетырёхгранной призмы. Эта погрешность носит случайный характер и обусловлена точностью наведения визирной трубы на грань призмы (совмещения шкалы визирной трубы и биссектора), зависящей от оператора, производящего измерение. Опытным путём выявлено максимально возможное значение вносимой погрешности, равное 0,2 с.

2. Погрешность совмещения шкалы визирной трубы тахеометра и шкалы автоколлиматора. Погрешность носит случайный характер. Возникает из-за слишком большой подачи микровинта горизонтального перемещения тахеометра и недостаточного увеличения визирной трубы. Среднеквадратичное отклонение значений, получаемых одним оператором при многократном наведении визирной трубы при помощи микровинта, составляет две угловые секунды. В практике для уменьшения этой погрешности проводились серия измерений из шести подводов визирной трубы и их усреднение. Таким образом, повторяемость значения при повторном прохождении этой грани обеспечивалась с точностью в 0.7 с.

3. Погрешность, вносимая непараллельностью оси тахеометра и оси вращения двадцатичетырёхгранной призмы. Эта погрешность носит систематический характер.

4. Погрешность, вносимая несоосностью призмы и тахеометра. Эта погрешность носит систематический характер.

Рассмотрим математическую модель возникающей погрешности. При этом одной из наиболее важных составляющих систематической погрешности при измерениях является погрешность, возникающая при неточной установке угломерного прибора (эксцентриситет  $e$ ).

На рис. 1 показано положение осей углоизмерительной установки и углоизмерительного прибора. Частные положения углоизмерительного прибора обозначены  $O_1, O_2, O_3$ .

В начальный момент (соответствует индекс 1) эксцентриситет  $e = OO_1$  находится под  $\angle \varphi$  относительно оси  $x$ . Прямая линия, проведенная от точки  $O_1$  до удаленной в бесконечности точки  $M$ , является перпендикуляром к оси  $x$  по условию выбора системы координат.

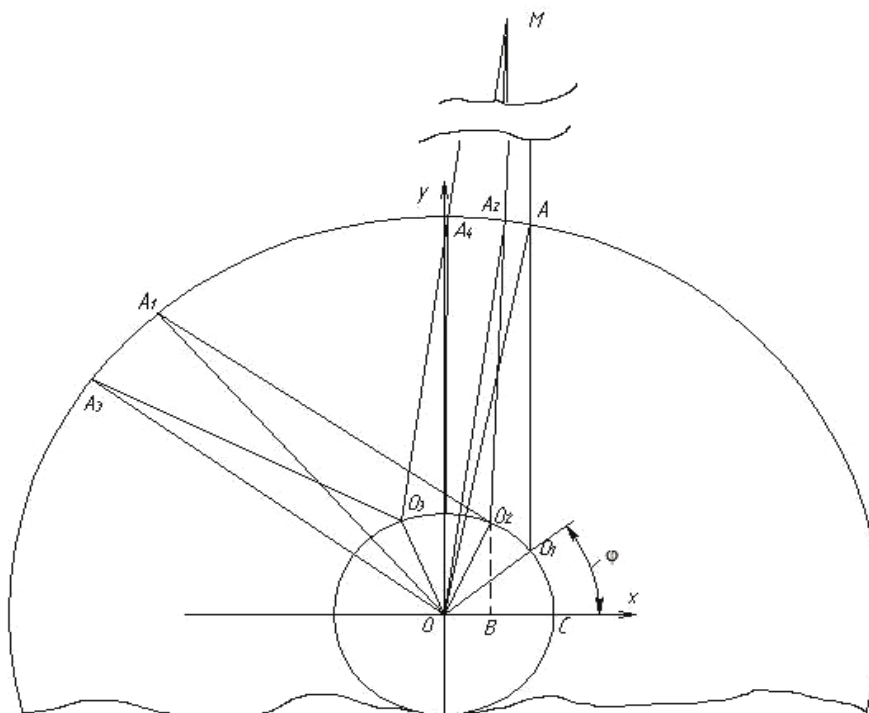


Рис. 1. Схема возникновения систематической погрешности

При повороте на  $\angle \alpha$  точка  $O_1$ , определяющая ось прибора, переходит в точку  $O_2$ . В связи с этим поворотом точка  $A$  переходит в точку  $A_1$ .

Относительно точки  $O_2$  поворачиваем систему так, чтобы настроиться на точку  $M$ . При этом точка  $A_1$  переходит в точку  $A_2$ .  $\angle A_1O_2A_2$  отсчитываем по шкале прибора.  $\angle O_1OO_2 = \alpha$  определяется углом призмы с поправкой.

Погрешность измерительной системы  $\Delta$  определяется разностью углов

$$\Delta = \angle A_1OA_2 - \alpha.$$

Оценим влияние  $\angle M$  на точность проводимых расчетов.

Пусть  $O_1M = l$ ;  $O_1C = l \times \sin(\varphi)$ ;  $OC = e \times \cos(\varphi)$ .

В силу малости величины  $e$  примем  $OB = OO_2 \times \cos(\alpha + \varphi) = e \times \cos(\alpha + \varphi)$ .

Тогда  $BC = OC - OB = e \times \cos(\varphi) - e \times \cos(\alpha + \varphi) = 2 \times e \times \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \times \sin\left(\varphi + \frac{\alpha}{2}\right)$ .

Значение угла  $\angle M$  определяем из

$$\tan(\angle M) = \frac{BC}{CM} = \frac{2 \times e \times \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \times \sin\left(\frac{\alpha}{2} + \varphi\right)}{1 + e \times \sin \varphi}.$$



Если  $l = \infty$ , то  $\angle M = 0$ . Пусть  $e = 0,005$ ,  $\alpha = 15^\circ$ ,  $\varphi = 30^\circ$ ,  $l = 10,5$  м, тогда  $\angle M = 0,07557 \times 10^{-6}$  рад. Это соответствует  $15,6 \times 10^{-3}$  угловых секунд. При таких условиях  $\angle M$  можно пренебречь.

Для определения погрешности  $\Delta$  рассмотрим систему координат  $XOY$ . Найдём  $\angle AOC$ :

$$\tan(\angle AOC) = \frac{AC}{OC},$$

где  $AC = AO_1 + O_1C$ .

Соответственно

$$\tan(\angle AOC) = \frac{1 + \frac{e}{R} \times \sin(\varphi)}{\frac{e}{R} \times \cos(\varphi)}.$$

Точка  $A_1$  имеет координаты  $(x_1; y_1)$ ,

где  $x_1 = R \times \cos(\alpha + \angle AOC)$ ,  $y_1 = R \times \sin(\alpha + \angle AOC)$ .

Точка  $O_2$  имеет координаты  $(x_2; y_2)$ ,

где  $x_2 = e \times \cos(\varphi + \alpha)$ ,  $y_2 = e \times \sin(\varphi + \alpha)$ .

Составим уравнение прямой, проходящей через точки  $A_1$  и  $O_2$ :

$$\frac{y - y_2}{y_1 - y_2} = \frac{x - x_2}{x_1 - x_2};$$

$$y = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} x - \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} x_2 + y_2.$$

Угловой коэффициент прямой  $A_1O_2$  определяем из уравнения  $k = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}$ :

$$k = \frac{R \times \sin(\alpha + \angle AOC) - e \times \sin(\varphi + \alpha)}{R \times \cos(\alpha + \angle AOC) - e \times \cos(\varphi + \alpha)} = \frac{\sin(\alpha + \angle AOC) - \frac{e}{R} \times \sin(\varphi + \alpha)}{\cos(\alpha + \angle AOC) - \frac{e}{R} \times \cos(\varphi + \alpha)}.$$

По причине малости величины  $e$  примем:

$$\sin(\alpha + \angle AOC) - \frac{e}{R} \times \sin(\varphi + \alpha) \rightarrow \sin(\varphi + i \times \alpha);$$

$$\cos(\alpha + \angle AOC) - \frac{e}{R} \times \cos(\varphi + \alpha) \rightarrow \cos(\varphi + i \times \alpha).$$

При изменении положения точки от  $O_1$  к  $O_2$  и далее к  $O_3$  изменяется и  $\angle \varphi$ . от  $\angle \varphi$  к  $\angle(\varphi + \alpha)$  и далее к  $\angle(\varphi + 2\alpha)$ . Что в итоге определяет  $\angle(\varphi + (i - 1)\alpha)$ , где  $i = 1, 2, 3 \dots 24$ .

При изменении точки  $(x_2; y_2)$  изменяется и  $\angle AOC$ . Таким образом,

$$\angle AOC = \arctan \frac{1 + \frac{e}{R} \times \sin(\varphi + (i - 1)\alpha)}{\frac{e}{R} \times \cos(\varphi + (i - 1)\alpha)};$$

$$\angle M = \tan \angle M = \frac{2 \times e \times \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \times i \times \sin\left(\varphi + i \frac{\alpha}{2}\right)}{l + e \times \sin(\varphi + (i - 1)\alpha)}.$$

Угол  $\angle A_1O_2A_2 = \arctan(R) + 90^\circ + \angle M$ .

Погрешность  $\Delta = \angle A_1O_2A_2 - \alpha = \arctan(R) + 90^\circ + \angle M - \alpha$ .

Установленный вид погрешности позволяет сделать вывод о полигармоническом характере радиального биения оси вращения стола. При этом паспортное значение прибора составляет 0,12 мкм. Модель поведения погрешности проверена на экспериментальной установке «Универсальный метрологический комплекс МИИГАиК». Вычислительные эксперименты показали уменьшение систематической погрешности для системы «электронный тахеометр-призма» в три раза.