

# АПРОБАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЛАЗЕРНОГО ТРЕХКООРДИНАТНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ДИАМЕТРА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

**А.А. Коба**

*Томский политехнический университет, г. Томск*

*Научный руководитель: Федоров Е.М., к.т.н., доцент кафедры физических методов и приборов контроля качества ТПУ*

В работе предложен трехкоординатный метод измерения диаметра и овальности цилиндрических объектов в расходящемся лазерном пучке. Разработано математическое обеспечение метода, а также, произведены его виртуальное моделирование и экспериментальная апробация. Полученные результаты могут быть использованы для разработки и изготовления бесконтактных оптических приборов технологического контроля наружного диаметра изделий кабельной, трубной и других отраслях промышленности.

Схема рассматриваемого трехкоординатного измерителя показана на рис. 1. Прибор содержит три измерительных канала, оси которых  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  расположены относительно друг друга на угол  $120^\circ$ . В каждом канале имеется точечный излучатель (полупроводниковый лазер), создающий расходящийся световой поток и многоэлементный фотоприёмник, измеряющий размер тени падающей от объекта. Объект измерения находится в зоне контроля, освещается тремя излучателями, и образуют три тени на фотоприемниках соответствующих измерительных каналов.

В работе [1] выведены выражения для расчета радиусов для каждой из осей в трехкоординатной оптической системе с расходящимся пучком:

$$\begin{aligned}
 R_X &= \sqrt{E_X^2 + \left( H_{X0} - \frac{E_Y}{\cos\left(\frac{\pi}{6}\right)} + \frac{E_X}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{3}\right)} \right)^2} \cdot \sin \frac{1}{2} \left( \operatorname{arctg} \frac{X_2}{H_X} - \operatorname{arctg} \frac{X_1}{H_X} \right); \\
 R_Y &= \sqrt{E_Y^2 + \left( H_{Y0} - \frac{E_X}{\cos\left(\frac{\pi}{6}\right)} + \frac{E_Y}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{3}\right)} \right)^2} \cdot \sin \frac{1}{2} \left( \operatorname{arctg} \frac{Y_2}{H_Y} - \operatorname{arctg} \frac{Y_1}{H_Y} \right); \quad (1) \\
 R_Z &= \sqrt{E_Z^2 + \left( H_{Z0} + \frac{E_X}{\cos\left(\frac{\pi}{6}\right)} + \frac{E_Z}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{3}\right)} \right)^2} \cdot \sin \frac{1}{2} \left( \operatorname{arctg} \frac{Z_2}{H_Z} - \operatorname{arctg} \frac{Z_1}{H_Z} \right),
 \end{aligned}$$

где расстояния от центра объекта до соответствующих осей равны:

$$\frac{E_X}{X_0} = \frac{H_{X0} - \frac{E_Y}{\cos\left(\frac{\pi}{6}\right)} + \frac{E_X}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{3}\right)}}{H_X};$$

$$\frac{E_Y}{Y_0} = \frac{H_{Y0} - \frac{E_X}{\cos\left(\frac{\pi}{6}\right)} + \frac{E_Y}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{3}\right)}}{H_Y};$$

$$\frac{E_Z}{Z_0} = \frac{H_{Z0} + \frac{E_X}{\cos\left(\frac{\pi}{6}\right)} + \frac{E_Z}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{3}\right)}}{H_Z}.$$
(2)

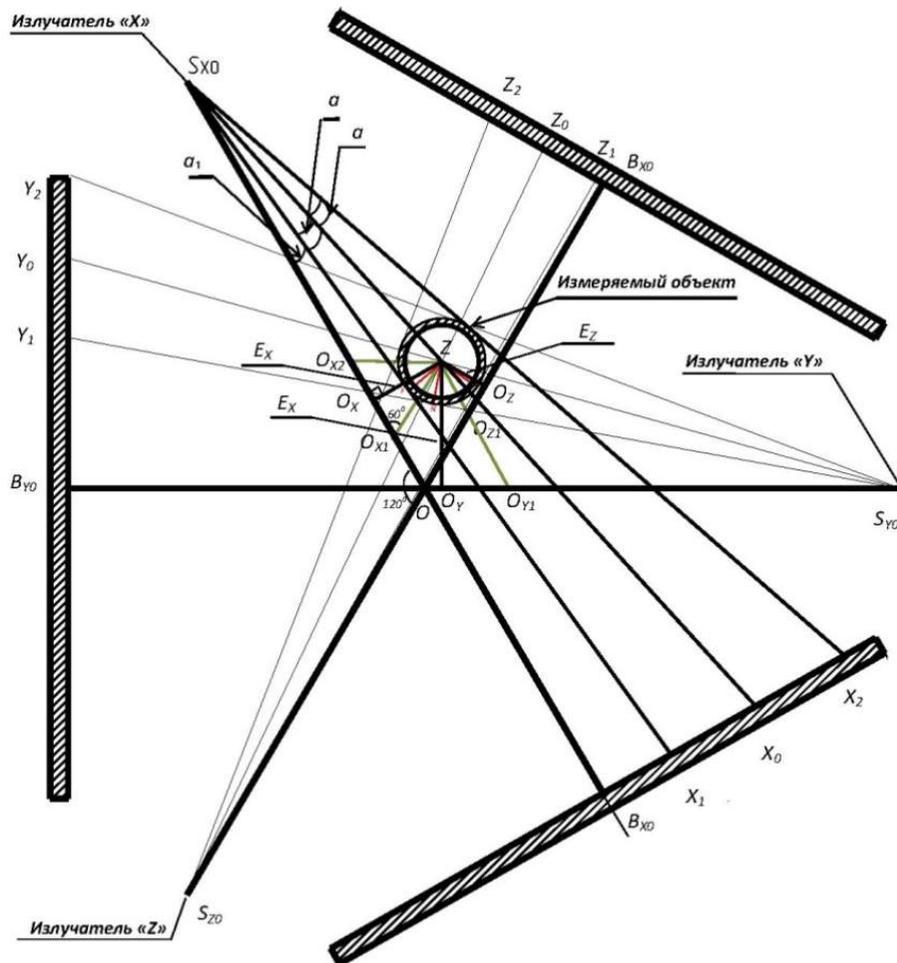


Рис. 2. Расчетная схема прибора с тремя измерительными осями

Положения проекции центра объекта на соответствующих много-электронных приемниках равны:

$$\begin{aligned} X_0 &= H_X \cdot \operatorname{tg} \frac{1}{2} \left( \operatorname{arctg} \frac{X_2}{H_X} + \operatorname{arctg} \frac{X_1}{H_X} \right); \\ Y_0 &= H_Y \cdot \operatorname{tg} \frac{1}{2} \left( \operatorname{arctg} \frac{Y_2}{H_Y} + \operatorname{arctg} \frac{Y_1}{H_Y} \right); \\ Z_0 &= H_Z \cdot \operatorname{tg} \frac{1}{2} \left( \operatorname{arctg} \frac{Z_2}{H_Z} + \operatorname{arctg} \frac{Z_1}{H_Z} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

#### *Апробация метода*

Для проверки предложенных выше выражений (1-3) было произведено компьютерное моделирование трёх координатного оптического преобразователя для измерения диаметра цилиндрических изделий. Компьютерная модель в соответствии с рис. 2 содержала три идентичных измерительных канала повернутых друг относительно друга на  $120^\circ$ . Начальные геометрические параметры для упрощения вычислений были взяты одинаковыми для всех измерительных каналов и имели следующие значения:

- расстояния от центра излучателя до плоскости приемника  $H_x = H_y = H_z = 300$  (мм);
- расстояния от центра излучателя до центра рабочей зоны являющейся центром пересечения осей измерительных каналов  $H_{x0} = H_{y0} = H_{z0} = 220$  (мм).

Такие значения геометрических параметров первичного преобразователя являются типичными для получения зоны измерения достаточной для большинства применений. Длина рабочей поверхности много-элементных приёмников в такой модели не превышает 100 мм. Все начальные геометрические параметры, а также виртуальные положения теней на плоскостях приёмников излучения по соответствующим каналам (рис. 2)  $X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z_1$  и  $Z_2$ , были определены в компьютерной модели с погрешностью  $\approx 1$  мкм. Для проверки были смоделированы круглые объекты с различным диаметром и различным расположением в виртуальной зоне измерения. При подстановке полученных при моделировании значений в выражения (1)–(3) были рассчитаны значения диаметров измеряемого объекта по соответствующим измерительным осям  $X, Y$  и  $Z$ . Значения расчётных диаметров осей  $D_x, D_y, D_z$  для трёх произвольных круглых объектов диаметром  $D$  приведены в табл. 1.

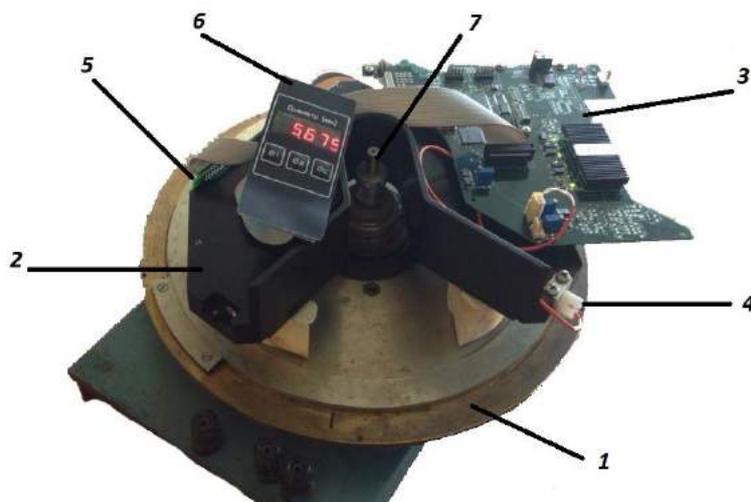
Абсолютная погрешность расчёта диаметра по измерительным осям  $\Delta D_x, \Delta D_y$  и  $\Delta D_z$ , а также средняя погрешность  $\Delta D_{\text{ср}}$  не превышает

3 мкм. Такой результат, учитывая погрешность определения начальных параметров, является вполне приемлемым результатом. Практика показывает, что точность расчёта диаметра очень сильно зависит от точности определения начальных параметров. В работе [2] приведены механизмы решения данной проблемы.

Таблица 1

*Значения диаметров погрешности по осям, полученных при компьютерном моделировании*

Измеряемый диаметр $D$ (мм)	Диаметр $D_x$ (мм)	Погрешность $\Delta D_x$ (мкм)	Диаметр $D_y$ (мм)	Погрешность $\Delta D_y$ (мкм)	Диаметр $D_z$ (мм)	Погрешность $\Delta D_z$ (мкм)	Погрешность $\Delta D_{ср}$ (мкм)
10.000	10.003	-3	10.002	-2	9.998	2	-1
17.000	16.997	3	16.999	1	17.002	-2	0.67
25.000	24.999	1	25.001	-1	25.000	0	0



*Рис. 3. Экспериментальная установка, состоящая из: 1 – поворотный стол; 2 – корпус преобразователя; 3 – управляющая электронная плата; 4 – точечный источник излучения (полупроводниковый лазер); 5 – плата ПЗС приёмника; 6 – индикатор с клавишами управления; 7 – объект с известным диаметром (калибр)*

Дальнейшая апробация метода и предложенной математической модели измерения проводилась с использованием реального прототипа измерительного устройства с расходящимся лазерным пучком. Для упрощения проведения эксперимента в установке был применён первичный измерительный преобразователь от измерителя диаметра «LDM-20» описанного в работе [3]. Внешний вид экспериментальной установки приведён на рис. 3. Прототип представлял из себя систему с одним

оптическим измерительным каналом, содержащим ПЗС сенсор и лазерный излучатель. Данный преобразователь был помещён на поворотный стол, способный вращаться на  $360^\circ$  с точностью установки угла поворота до 1 угловой минуты. В центре стола неподвижно размещался объект с известным диаметром (калибр). При вращении поворотного стола на углы  $0^\circ$ ,  $+120^\circ$  и  $-120^\circ$  был экспериментально воспроизведен трёхкоординатный преобразователь, показанный на рис. 2. Геометрические параметры оптического преобразователя имели следующие значения:

- Расстояния от центра излучателя до плоскости приемника  $H_x = H_y = H_z = 207.4$  (мм).

- Расстояния от центра излучателя до центра рабочей зоны  $H_{x0} = H_{y0} = H_{z0} = 134$  (мм).

- Размер пикселя применяемой ПЗС линейки (NEC uPD8871) равен 4 мкм. Количество пикселей 10680.

Экспериментально были измерены положения границ тени  $X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z_1$  и  $Z_2$  (рис. 2) далее, как и в компьютерной модели, с использованием выражений (1)–(3) были получены расчётные значения для трёх калибров с известным диаметром. Результаты расчёта диаметров и погрешностей их расчёта приведены в табл. 2.

Таблица 2

*Значения диаметров и погрешности по осям полученных экспериментально*

Диаметр калибра D (мм)	Диаметр $D_x$ (мм)	Погрешность $\Delta D_x$ (мкм)	Диаметр $D_y$ (мм)	Погрешность $\Delta D_y$ (мкм)	Диаметр $D_z$ (мм)	Погрешность $\Delta D_z$ (мкм)	Погрешность $\Delta D_{cp}$ (мкм)
14.842	14.832	-10	14.839	-3	14.847	5	-2,7
10.178	10.171	-7	10.170	-8	10.171	-7	-7,3
12.900	12,905	5	12.901	1	12.891	-9	-1

Абсолютная погрешность расчёта диаметра по измерительным осям  $\Delta D_x, \Delta D_y$  и  $\Delta D_z$ , а также средняя погрешность  $\Delta D_{cp}$ , хоть и незначительно превышает значения полученные при моделировании (таб. 2) всё равно остаётся в пределах 10 мкм. Данный результат очень хорошо согласуется с результатом моделирования. Это дополнительно доказывает верность вывода выражений (1)–(3) для расчёта диаметра в трёхкоординатных системах. Увеличение погрешности расчётных значений диаметра полученных из экспериментальных данных можно объяснить не идеальностью установки (рис. 3). Проектирование стойкой к деформации конструкции трёхкоординатного измерительно преобразователя и

применение алгоритмов цифровой обработки данных позволит преодолеть эти проблемы.

#### *Заключение*

Осуществлено компьютерное моделирование трёхкоординатного преобразователя данные которого хорошо коррелируются с экспериментальными, что подтвердило правильность предложенной функции преобразования. Применение описанного и смоделированного в данной работе оптического метода и его математического обеспечения позволит создать первичный измерительный преобразователь для прибора контроля диаметра и овальности протяжённых изделий.

#### **Список информационных источников**

1. Коба А.А. Расчет диаметра в бесконтактных трехкоординатных измерителях с расходящимся лазерным пучком // Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность: VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2016. – Т. 1. – С. 155–160.
2. Chursin Y.A., Fedorov E. M. Method of resolution enhancement to flares diameter measuring instruments // Optics & Laser Technology. – 2015. – Vol. 67. – pp. 86–92.
3. Svendrovskii A.R., Raschet diametra v beskontaktnykh dvukhkoordinatnykh izmeritelyakh // Proceedings of the 1st all-Russian science conference on Scientific and Engineering problems of instrument engineering. – Tomsk. 2005. – pp. 31–33.