

УДК 620.179.1.082.5.05

**БЕСКОНТАКТНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ДИАМЕТРА И ОВАЛЬНОСТИ КРУГЛЫХ  
ПРОТЯЖЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ  
(CONTACTLESS INSTRUMENT OF DIAMETER AND OVALITY MEASUREMENT OF  
ROUND EXTENDED PRODUCTS)**

Н. Е. Мыктыбаев, Е. М. Федоров  
N.E. Muktibaev, E.M. Fedorov

Томский политехнический университет  
E-mail: evgeny\_fyodorov@list.ru

Предложены оптические методы технологического контроля наружного диаметра круглых протяженных изделий, алгоритмы преобразования сигналов первичной измерительной информации, конструкции преобразователей.

(An optical in-process control techniques of round extended products outer diameter is proposed, transformation algorithms of primary measuring signals and transducers construction is offered.)

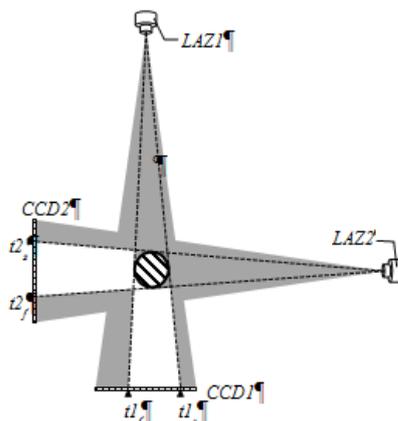
**Ключевые слова:**

Контроль диаметра, бесконтактные измерения.

(Diameter control, contactless measurements)

**Введение**

Метод измерения диаметра протяжённых изделий в расходящемся световом потоке основан на определении границ тени объекта с использованием многоэлементных линейных фотоприёмников в двух ортогональных измерительных каналах. На рис. 1 схематично показан оптический двухкоординатный первичный преобразователь, реализующий данный метод. Пунктирной линией указан ход лучей, которые проходят от соответствующих квазиточечных излучателей *LAZ1* и *LAZ2* по касательной к краям контролируемого объекта и формируют границы света – тени  $t1_f$ ,  $t1_s$  и  $t2_f$ ,  $t2_s$  на соответствующих многоэлементных фотоприёмниках *CCD1* и *CCD2*. Подробное описание метода и функций преобразования первичной измерительной информации приведены в работах [1, 2].



**Рис. 1.** Метод измерения диаметра в расходящемся световом пучке. *LAZ1*, и *LAZ2*, точечные излучатели а *CCD1* и *CCD2* многоэлементные фотоприёмники соответственно первого и второго измерительных каналов.  $t1_f$ ,  $t1_s$  и  $t2_f$ ,  $t2_s$  – изображения границ теней объекта

На практике определение точного геометрического положения теней объекта по фронту или срезу изображения его тени на многоэлементном приёмнике является очень сложной задачей, так как крутизна и форма изображений границ меняется в зависимости от локальной освещённости фотоприёмника и от положения измеряемого объекта относительно поверхности

фотоприёмника в ортогональной ему плоскости. На достоверность определения границ тени контролируемого объекта влияют, неизбежно возникающие в процессе эксплуатации измерительного оборудования, дефекты – такие как царапины оптических стёкол, пыль, загрязнения и т.п. Даже если учесть или исключить все вышеперечисленные факторы, то всё равно погрешность приборов основанных на данном методе ограничена дифракционными эффектами на границе измеряемого объекта, которые приводят к размытию фронтов изображения тени объекта. Методы, использующие эффект дифракции, для определения размеров сверхтонких непрозрачных объектов в частности волокон диаметром до нескольких сотен микрон известны давно и описаны в работах [2,3]. В работах [4,5] описаны дифракционные эффекты на границе непрозрачных объектов в параллельном световом пучке. Их широко применяют для повышения точности контроля геометрических размеров объектов, в частности кабелей, валов и т.п. Анализ дифракционной картины для повышения разрешающей способности приборов на основе расходящегося светового потока при контроле геометрических размеров больших объектов реализован в измерительных приборах фирм: SikoraAG, ZumbachElectronicSrl однако функция преобразования дифракционной картины в конечный диаметр отсутствует в свободном доступе. Это накладывает определённые ограничения на использование эффекта дифракции в приборах с расходящимся световым пучком.

### Дифракционный метод расчёта диаметра

Суть эффекта дифракции на границе непрозрачных объектов пояснена рис.2. Свет частично проникает в область геометрической тени, а в освещённой области формирует систему дифракционных минимумов и максимумов, различие между которыми постепенно уменьшается и интенсивность света приближается к значению начальной освещённости  $I_0$ . Расстояние от источника до приёмника  $L$  зависит от конструктивных особенностей оптического измерительного преобразователя и является величиной постоянной. Значение параметра  $y$  может изменяться в зависимости от положения объекта в зоне контроля [6].

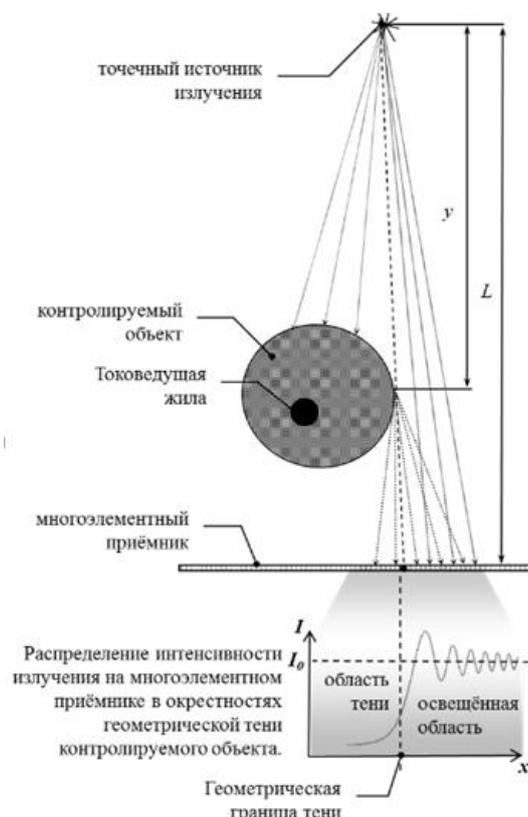


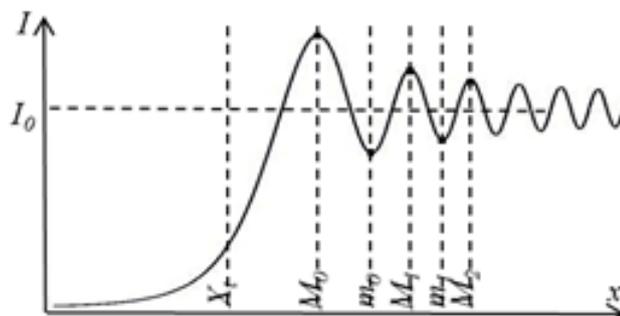
Рис. 2. Эффект вибрации на границе цилиндрического объекта

В случае, когда граница тени проецируется на плоскость фотоприёмника ортогонально, расстояние  $X_i$  от точки геометрической тени  $X_t$  до соответствующего максимума  $M_i$

дифракционной картины и расстояние  $x_i$  от той же точки  $X_t$  до соответствующего минимума  $m_i$  определяются следующими выражениями:

$$X_i = \sqrt{\frac{\lambda L(L-y)}{2y} \left(4i + \frac{3}{2}\right)}, \quad x_i = \sqrt{\frac{\lambda L(L-y)}{2y} \left(4i + \frac{7}{2}\right)}, \quad (1)$$

где  $i$  – номер соответствующего максимума или минимума начиная с нулевого,  $L$  – расстояние от точечного источника излучения до многоэлементного фотоприёмника,  $y$  – расстояние от источника до границы объекта на котором происходит дифракция  $\lambda$  – длина волны источника излучения (рис. 3).



**Рис.3.** Распределение дифракционных экстремумов на видео изображении окрестностей геометрической границы тени:  $X_t$  – геометрическая граница тени,  $M_0, M_1, M_2$  – положения максимумов первого, второго и третьего порядков,  $m_0, m_1$  – положение минимумов первого и второго порядков

Положение проекции геометрической границы тени  $X_t$  на многоэлементном приёмнике является исходной величиной для вычисления диаметра объекта по методу, описанному в работе [1]. Найти положение проекции геометрической границы тени можно определив расстояние между первыми двумя максимумами (отрезок  $M_0M_1$ ) или минимумами (отрезок  $m_0m_1$ ) рис. 3. Так как в выражении (1) множитель  $\sqrt{\lambda L(L-y)/2y}$  остаётся постоянным для положения всех экстремумов, то их распределение определяется множителем  $\sqrt{4i + 3/2}$  для максимумов и соответственно множителем  $\sqrt{4i + 7/2}$  для минимумов. Таким образом, расстояния между экстремумами могут пропорционально меняться в зависимости от параметров  $L, y$ , но их соотношения остаются постоянными. В частности отрезок  $X_tM_0$  относится к отрезку  $M_0M_1$  с постоянным коэффициентом  $k_M=1.093$ , а отрезок  $X_tm_0$  к отрезку  $m_0m_1$  с коэффициентом  $k_m=2.154$ . Это свойство позволяет вывести выражения для нахождения координат положений геометрических границ теней переднего и заднего фронтов видеоизображения объекта сканируемого многоэлементным линейным фотоприёмником.

$$\begin{aligned} X_{ft} &= 1.093(M_0 - M_1) + M_0 = 2.154(m_0 - m_1) + m_0 \\ X_{st} &= M_0 - 1.093(M_1 - M_0) = m_0 - 2.154(m_1 - m_0), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $X_{ft}$  и  $X_{st}$  – положения передней и задней границы тени;  $M_0, M_1, m_0, m_1$  – экстремумы дифракционного распределения.

В работе [1] выведены выражения для расчета диаметров  $D_x$  и  $D_y$  для каждой из осей в двухкоординатной оптической системе с расходящимся пучком:

$$\begin{aligned} D_x &= 2\sqrt{E_x^2 + (H_{x0} - E_y)^2} \sin \frac{1}{2} \left( \arctg \frac{X_2}{H_x} - \arctg \frac{X_1}{H_x} \right), \\ D_y &= 2\sqrt{E_y^2 + (H_{y0} - E_x)^2} \sin \frac{1}{2} \left( \arctg \frac{Y_2}{H_y} - \arctg \frac{Y_1}{H_y} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где расстояния от центра объекта до соответствующих осей  $E_x$  и  $E_y$  равны:

$$E_x = \frac{X_0 H_y \left( H_{x0} - Y_0 \frac{H_{y0}}{H_y} \right)}{(H_x H_y - X_0 Y_0)},$$

$$E_y = \frac{Y_0 H_x \left( H_{y0} - X_0 \frac{H_{x0}}{H_x} \right)}{(H_x H_y - X_0 Y_0)}.$$
(4)

Положения проекции центра объекта на соответствующих многоэлементных приёмниках  $X_0$  и  $Y_0$  равны:

$$X_0 = H_x \operatorname{tg} \frac{1}{2} \left( \operatorname{arctg} \frac{X_2}{H_x} + \operatorname{arctg} \frac{X_1}{H_x} \right),$$

$$Y_0 = H_y \operatorname{tg} \frac{1}{2} \left( \operatorname{arctg} \frac{Y_2}{H_y} + \operatorname{arctg} \frac{Y_1}{H_y} \right),$$
(5)

где в свою очередь положения начала  $X_1, Y_1$  и конца  $X_2, Y_2$  теней объекта на соответствующих приёмниках равны:

$$X_1 = f_x - B_{x0}, \quad X_2 = s_x - B_{x0},$$

$$Y_1 = f_y - B_{y0}, \quad Y_2 = s_y - B_{y0}.$$
(6)

Фронты и спады теней соответствующих приёмников  $f_x, s_x$  и  $f_y, s_y$  собственно являются измеренными значениями необходимыми для расчёта диаметра по вышеприведённым выражениям.

В работе [1] при выводе выражений (1–4) делается допущение о том, что изначально известны следующие параметры конструкции прибора:

Расстояния  $H_x$  и  $H_y$  от центра излучателя до плоскости приемника каждого из каналов.

Расстояния  $H_{x0}$  и  $H_{y0}$  от центра излучателя до центра рабочей зоны, т. е. до точки (0), являющейся пересечением измерительных осей.

Начала координат, являющиеся «нулевыми» ячейками приемников, расположенными в точках  $B_{x0}$  и  $B_{y0}$ .

В реальном измерительном приборе эти параметры далеки от конструктивных из-за неточности изготовления деталей, неидеальности реальной оптической системы, в отличие от теоретически смоделированной. Также ошибки вносит тот фактор, что реальный источник излучения (полупроводниковый лазер) все-таки является не идеально точечным. Если же в реальном приборе при расчёте диаметра использовать геометрические параметры, взятые из конструкции, то вычисленный диаметр не удовлетворяет требуемой погрешности. Измерить же эти параметры с достаточной точностью технически невозможно. Таким образом, для достижения необходимой точности вычисления диаметра измеряемого объекта по формулам (3–6), мы должны решить обратную задачу, то есть, имея набор круглых аттестованных калибров с известными диаметрами, необходимо отыскать точные значения шести геометрических параметров  $H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}$ .

Для вычисления необходимых геометрических параметров для каждого конкретного измерителя можно составить систему из шести уравнений, используя три аттестованных круглых калибра с известными диаметрами  $D_1, D_2, D_3$ , для упрощения записи уравнений, выражения (3-6) в них входящие, обозначены как  $f_i(H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0})$  при  $i=1-6$ . Причём каждому уравнению соответствуют свои уникальные измеренные значения фронта и спада  $f_x, s_x$  и  $f_y, s_y$  по соответствующим измерительным осям. Уравнения являются независимыми друг от друга, однако точного аналитического или численного решения такой системы не существует из-за того, что реальная оптическая система отлична от идеальной описанной в работе [1].

$$\left\{ \begin{array}{l} D_{1_x} = f_1(H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}) \\ D_{1_y} = f_2(H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}) \\ D_{2_x} = f_3(H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}) \\ D_{2_y} = f_4(H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}) \\ D_{3_x} = f_5(H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}) \\ D_{3_y} = f_6(H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}) \end{array} \right. \quad (7)$$

Однако каждое из уравнений системы (7) можно заменить соответствующим неравенством вида:  $D_i - p < f_i(H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}) < D_i + p$ , где  $p$  это максимальная допустимая погрешность прибора для которого осуществляется поиск геометрических параметров. Таким образом, система уравнений преобразуется в систему неравенств, решая которую числовыми методами, можно отыскать совокупность значений геометрических параметров  $H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}$ , которые удовлетворяют требуемой максимальной погрешности  $p$  прибора, при вычислении диаметра круглых объектов по выражениям (3-6).

Однако, учитывая сложность и громоздкость уравнений входящих в систему, а также количество неизвестных переменных в ней, даже на современных компьютерах задача поиска числовым методом значений удовлетворяющих системе очень трудоемка, занимает необычайно много времени даже на самой современной компьютерной технике. Поэтому этот метод поиска значений не приемлем для серийного выпуска приборов.

Для упрощения способа отыскания необходимых геометрических параметров мы попробовали оценить влияние каждого из них на конечный диаметр. Для этого мы поочередно строили зависимости расчётного диаметра для каждой из осей  $X$  и  $Y$ , от каждого из геометрических параметров  $H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}$  при этом остальные параметры принимали равными конструктивным. Влияние последней тройки параметров на конечный результат на два порядка слабее, чем первой. Это даёт нам возможность принять их значения равными конструктивным и в дальнейшем считать известными величинами. При анализе влияния геометрических параметров на расчётный диаметр по оси  $Y$  получилась зеркальная ситуация, т. е. там за константы можно принять параметры  $H_{x0}, H_x, B_{y0}$ . Таким образом диаметр по оси  $X$  является функцией параметров  $H_{x0}, H_x, B_{y0}$ , а диаметр по оси  $Y$  функцией параметров  $H_{y0}, H_y, B_{x0}$ . Так как диаметры по разным осям зависят от разных геометрических параметров, то системы неравенств для вычисления этих параметров можно решать независимо для каждой из координат. Исходя из этого систему уравнений (5) возможно упростить и записать следующим образом в виде двух независимых систем неравенств для каждой из измерительных осей:

$$\text{Для координаты } X: \{ Dx_i - p \leq f_i(H_{x0}, H_x, B_{y0}) \leq Dx_i + p \}. \quad (8)$$

$$\text{Для координаты } Y: \{ Dy_i - p \leq f_i(H_{y0}, H_y, B_{x0}) \leq Dy_i + p \}, \quad (9)$$

где  $i=1-3$  для обеих систем.

Такое допущение существенно, на три порядка, сокращает объём необходимых вычислений и упрощает систему (7), а соответственно и задачу по поиску числовыми методами геометрических параметров при которых погрешность  $p$  измерения прибора меньше максимально допустимой. В работе [2] наряду с точным решением предложено упрощенное, где в результате некоторых допущений в выражениях для расчета диаметра по оси  $X$  и  $Y$  исчезают соответственно параметры  $H_y, B_{x0}$  и  $H_x, B_{y0}$ , так же как и в нашем случае, что косвенно свидетельствует о верности подхода к решению поставленной задачи.

Так как системы уравнений (8,9) также как и система (7) не имеют аналитического решения, то для нахождения искомых значений воспользуемся методом подбора искомых значений с последовательным приближением к наиболее точному решению. Для

автоматизации процесса расчёты производятся на персональном компьютере с использованием программы специально написанной для этой цели. Алгоритм работы этой программы следующий: В первом приближении программа перебирает значения искомым геометрических параметров с шагом 1 мм и подставляет их поочерёдно в системы уравнений для первой и второй координат. Область предполагаемых значений геометрических параметров приблизительно известна с точностью до 1 сантиметра, поэтому диапазон изменения для каждого из параметров берём равным 10 мм. Всего в первом приближении получается 1000 вариантов сочетаний параметров для каждой измерительной оси. При переборе всех возможных вариантов оцениваются значения  $\Delta D1$ ,  $\Delta D2$ ,  $\Delta D3$ , взятые по модулю, которые находятся как разность соответствующих эталонных калибров и значений, вычисленных программой при переборе, при этом ищется такое сочетание параметров, при котором все три значения  $\Delta D1$ ,  $\Delta D2$ ,  $\Delta D3$  одновременно минимальны. Таким образом, после окончания перебора в первой итерации мы имеем значения геометрических параметров, определённых с точностью до одного мм, давшие наименьшую погрешность во всём диапазоне измеряемых диаметров. Однако при этих значениях погрешность  $\Delta D1$ ,  $\Delta D2$ ,  $\Delta D3$  всё равно ещё не соответствует требуемой, поэтому производится еще несколько (обычно 2-3) переборов по аналогичному алгоритму, но с последовательным сужением диапазона поиска в 10 раз и с таким же уменьшением шага изменения искомым величин.

Такой механизм позволяет с точностью до 1 мкм определять геометрические параметры конкретного измерительного прибора. Использование полученных таким способом значений  $H_{x0}, H_{y0}, H_x, H_y, B_{x0}, B_{y0}$  при вычислении диаметра с применением выражений (3-6), с учётом упрощений (8,9), позволяет достичь требуемой погрешности (10-15 мкм) измерительных приборов, использующих теневой метод измерения в расходящемся световом потоке [7,8], и обеспечить их высокие метрологические характеристики.

#### **Заключение**

В работе рассмотрен метод измерения диаметра, позволяющий с высокой достоверностью разрешать дифракционную картину и находить положения экстремумов дифракционных полос. Получено выражение, позволяющее вычислять точное положение геометрической границы тени объекта, не прибегая к амплитудному анализу фронта его изображения. Использование полученных значений параметров прибора при вычислении диаметра позволяет достичь требуемой погрешности (1...5 мкм) для серийных измерительных приборов и обеспечить их высокие эксплуатационные и метрологические характеристики.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Фролов Д.Н., Свендровский А.Р., Гольцеймер А.А., Гладышев Ю.Г. Опыт разработки устройства бесконтактного измерения диаметра кабельных изделий // Электротехника. – 1991. – № 3. – С. 26–28.
2. Sommerfeld A., Optics (German edition 1950, English translation: Academic Press, 1964), sec 37, 38.
3. Born and E. Wolf, Principles of Optics, 3rd Edition Pergamon Press, 1965.
4. Toenshoff, H. K., Tuennermann, A., Korthals, J., SPIE, Use of Fresnel diffraction for the measurement of rotational symmetrical workpieces. Proceedings SPIE The International Society For Optical Engineering, 3784, 1999, Pp. 334-343.
5. Chi-Tang Li, James V. Tietz, Improved accuracy of the laser diffraction technique for diameter measurement of small fibres. Journal of Materials Science, 1990, Volume 25, Issue 11, Pp. 4694-4698.
6. Свендровский А.Р. Расчёт диаметра в бесконтактных двухкоординатных измерителях // Научно-технические проблемы приборостроения и машиностроения: Тез. докл. I Всеросс. конф. – Томск, 2005. – С. 31–33.
7. Yury A. Chursin, Evgeny M. Fedorov "Methods of resolution enhancement of laser diameter measuring instruments"//Optics & Laser Technology, 2015. – Volume 67. – pp. 86-92.

8. Фёдоров Е.М., Эдличко А.А. Вычисление геометрических параметров двухкоординатных измерителей диаметра протяженных изделий // Известия Томского Политехнического Университета. – 2008 г. – Т. 313 – №2 – С. 87–93.

**Сведения об авторах:**

**Мыктыбаев Н. Е.:** г.Томск, магистрант, Томский политехнический университет

**Федоров Е. М. :** г. Томск, к.т.н. доцент, Томский политехнический университет