

РАСЧЕТ ДИАМЕТРА В БЕСКОНТАКТНЫХ ТРЁХКООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЯХ

Е.М. Фёдоров, А.А. Коба

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.

Ключевые слова: контроль диаметра, расчёт диаметра, расходящийся пучок, овальность, трёхкоординатный метод.

ВВЕДЕНИЕ

Качество кабельных изделий характеризуется различными геометрическими и электрическими параметрами. Сведение выхода брака к минимуму достигается посредством совершенствования технологии контроля основных характеристик изделия, таких как погонная ёмкость [1–3], эксцентricность [4], наружный диаметр [5, 6], целостность изоляции [7] и другие.

Бесконтактные измерители диаметра круглых протяженных изделий, таких как кабель, канаты, трубы и т.п., использующие теневой метод измерения в расходящемся световом потоке, обладают целым рядом неоспоримых преимуществ, связанных с отсутствием в них элементов линзовой и зеркальной оптики. В частности, достижимая точность измерения таких приборов при использовании дифракционных методов совместно со статистической обработкой данных [8] может достигать долей микрометра. Однако работа в расходящемся световом потоке вызывает изменение размеров тени измеряемого объекта при его перемещениях в зоне контроля. Последнее требует использования сложных соотношений для расчета истинного диаметра объекта [9]. Двухкоординатные измерители обеспечивают получение приближенных значений овальности которая оценивается исходя из разности диаметров по двум измерительным осям, которые напрямую зависят от ориентации объекта внутри измерительного поля. При этом существуют определённые положения объекта, при которых овальность в принципе не может быть зафиксирована. На рисунке 1 приведены примеры ориентации объекта имеющего поперечное сечение в форме эллипса, в двухкоординатных и трех-

координатных измерителях. Из рисунка видно, двухкоординатные измерители не могут характеризовать параметры овальности, исключением является только тот случай, когда эллипс, ориентирован так, что его оси совпадают с осями измерителя.

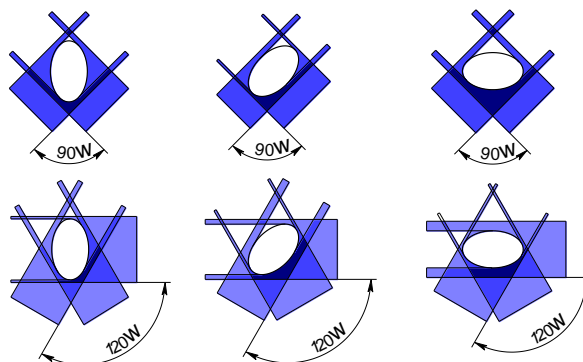


Рисунок 1 – Примеры ориентации объекта с некруглым сечением в двухкоординатных и трёхкоординатных измерителях

Измерение в трёхкоординатных лазерных системах с расходящимся лазерным пучком может отчасти решить описанные выше проблемы. Перечислим преимущества трехкоординатного измерителя в сравнении с двухкоординатным: три синхронизированные измерительные оси на одной плоскости, обнаружение любых отклонений от круглого сечения вне зависимости от ориентации объекта в зоне измерения, вычисление размеров длины окружности и площади поперечного сечения.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ДИАМЕТРА

Истинный диаметр в трёхкоординатных лазерных системах также как и в двухкоорди-

РАСЧЕТ ДИАМЕТРА В БЕСКОНТАКТНЫХ ТРЕХКООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЯХ

натных величина расчётная, поэтому необходим вывод математических выражений для его вычисления.

Схема рассматриваемого трехкоординатного измерителя показана на рисунке 2. Прибор содержит три измерительных канала, оси которых X, Y и Z расположены относительно друг друга на угол 120°. В каждом канале имеется точечный излучатель (полупроводниковый лазер), создающий расходящейся 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.

Изначально известны следующие параметры конструкции прибора:

- расстояния H_x , H_y и H_z от центра излучателя до плоскости приемника каждого из каналов: отрезки $(S_{X0}; B_{X0})$, $(S_{Y0}; B_{Y0})$ и $(S_{Z0}; B_{Z0})$;

- расстояния H_{X0} , H_{Y0} и H_{Z0} от центра излучателя до центра рабочей зоны, т.е. до точки (0), являющейся воображаемой точкой пересечения осей симметрии измерительных каналов;

- шаг ячеек фотоприемника, позволяет по числу ячеек приемника, закрытых тенью объекта, определить размер тени, т.е её ширину, а также определить смещение центра тени относительно «нулевой» ячейки приемника.

На основании известных данных необходимо определить радиусы объектов по трем каналам (R_x, R_y, R_z). Также определить средний радиус R_{CP} и овальность OB . Для специальных измерений также требуется информация о положении объекта (смещении его центра Z) относительно центра рабочей зоны измерителя (точки «0»), т.е. величины E_x, E_y и E_z

Этап 1 – определение положения проекции центра объекта Z на плоскости приемников «X», «Y» и «Z».

Положение проекции центра характеризуется величинами X_0, Y_0 и Z_0 , которые представляют собой отрезки $(B_{X0}; X_0)$, $(B_{Y0}; Y_0)$ и $(B_{Z0}; Z_0)$. Из треугольника $(S_{X0}; B_{X0}; X_0)$ известно:

$$\operatorname{tg}(\alpha + \alpha_1) = \frac{X_0}{H_x}.$$

Отсюда:

$$X_0 = H_x * \operatorname{tg}(\alpha + \alpha_1) \quad (1)$$

Величину α_1 , присутствующую в выражении (1), найдем из треугольника $(S_{X0}; B_{X0}; X_1)$:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{X_1}{H_y}; \quad \alpha_1 = \operatorname{arctg} \frac{X_1}{H_y}. \quad (2)$$

Угол α определим из треугольника $(S_{X0}; B_{X0}; X_2)$:

$$\operatorname{tg}(\alpha + \alpha + \alpha_1) = \frac{X_2}{H_x}; \quad (2\alpha + \alpha_1) = \operatorname{arctg} \frac{X_2}{H_x}.$$

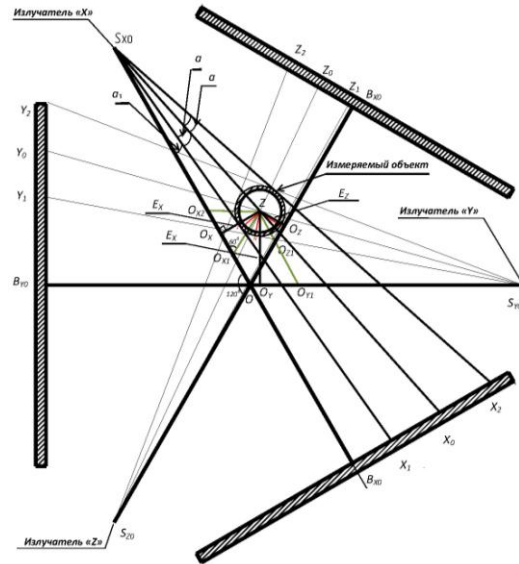


Рисунок 2 – Расчетная схема прибора с тремя измерительными осями

С учетом выражения (2) соотношение для угла α примет вид:

$$\alpha = \frac{1}{2} (\operatorname{arctg} \frac{X_2}{H_x} - \operatorname{arctg} \frac{X_1}{H_x}) \quad (3)$$

Подставив (3) в (1) и проведя преобразования, получим в итоге:

$$X_0 = H_x * \operatorname{tg} \frac{1}{2} (\operatorname{arctg} \frac{X_2}{H_x} + \operatorname{arctg} \frac{X_1}{H_x}) \quad (4)$$

Аналогично для величины Y_0 и Z_0 :

$$Y_0 = H_y * \operatorname{tg} \frac{1}{2} (\operatorname{arctg} \frac{Y_2}{H_y} + \operatorname{arctg} \frac{Y_1}{H_y}) \quad (5)$$

$$Z_0 = H_z * \operatorname{tg} \frac{1}{2} (\operatorname{arctg} \frac{Z_2}{H_z} + \operatorname{arctg} \frac{Z_1}{H_z}) \quad (6)$$

Этап 2 – определение смещения центра объекта Z относительно центра рабочей зоны. Смещение характеризуется величинами E_x, E_y и E_z (рисунок 1).

Из подобия треугольников $(S_{X0}; B_{X0}; X_0)$ и $(S_{X0}; 0_x; Z)$:

$$\frac{E_x}{X_0} = \frac{(S_{X0}; 0_x)}{H_x}.$$

Аналогично:

$$\frac{E_y}{Y_0} = \frac{(S_{Y0}; 0_y)}{H_y}; \quad \frac{E_z}{Z_0} = \frac{(S_{Z0}; 0_z)}{H_z} \quad (7)$$

Величины отрезков $(S_{X0}; 0_x)$, $(S_{Y0}; 0_y)$ и $(S_{Z0}; 0_z)$, присутствующие в (7), найдем, учитывая, что отрезок $(0; 0_x)$ равен:

$$(0; 0_x) = (Z; 0_{y1}) - (0_{x2}; 0_x) = \frac{E_y}{\cos(\frac{\pi}{6})} - \frac{E_x}{\operatorname{tg}(\frac{\pi}{3})};$$

Отрезок

$$(0; 0_y) = (Z; 0_{x_2}) - (0_y; 0_{y_1}) = \frac{E_x}{\cos(\frac{\pi}{6})} - \frac{E_y}{\operatorname{tg}(\frac{\pi}{3})}.$$

Отрезок

$$(0; 0_z) = (Z; 0_{x_1}) + (0_z; 0_{z_1}) = \frac{E_x}{\cos(\frac{\pi}{6})} + \frac{E_z}{\operatorname{tg}(\frac{\pi}{3})}.$$

Тогда:

$$\begin{aligned} (S_{x_0}; 0_x) &= H_{x_0} - \frac{E_y}{\cos(\frac{\pi}{6})} + \frac{E_x}{\operatorname{tg}(\frac{\pi}{3})}; \\ (S_{y_0}; 0_y) &= H_{y_0} - \frac{E_x}{\cos(\frac{\pi}{6})} + \frac{E_y}{\operatorname{tg}(\frac{\pi}{3})}; \\ (S_{z_0}; 0_z) &= H_{z_0} + \frac{E_x}{\cos(\frac{\pi}{6})} + \frac{E_z}{\operatorname{tg}(\frac{\pi}{3})} \end{aligned} \quad (8)$$

С учетом выражения (8) пропорции (7) примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{H_{x_0} - \frac{E_y}{\cos(\frac{\pi}{6})} + \frac{E_x}{\operatorname{tg}(\frac{\pi}{3})}}{X_0} &= \frac{H_{y_0} - \frac{E_x}{\cos(\frac{\pi}{6})} + \frac{E_y}{\operatorname{tg}(\frac{\pi}{3})}}{Y_0}; \\ \frac{H_{z_0} + \frac{E_x}{\cos(\frac{\pi}{6})} + \frac{E_z}{\operatorname{tg}(\frac{\pi}{3})}}{Z_0} &= \end{aligned} \quad (9)$$

Выражения (9) представляют систему трех уравнений с тремя неизвестными E_x , E_y и E_z . Решая уравнения получим выражения для вычисления E_x , E_y и E_z в которых величины X_0 , Y_0 и Z_0 определяются соотношениями (4), (5) и (6). Расчет системы уравнений в буквенном виде приводит к объемным выражениям и в данной статье приводиться не будет.

Этап 3 – расчет радиусов R_x , R_y и R_z объекта.

Исходя из схемы, показанной на рисунке 1, радиус R_x , т.е. отрезок (F;Z), является стороной прямоугольного треугольника (S_{x_0} ; Z; F). Из этого треугольника:

$$R_x = (S_{x_0}; Z) * \sin \alpha \quad (10)$$

Отрезок (S_{x_0} ; Z) найдем из другого прямоугольного треугольника (S_{x_0} ; Z; 0_x):

$$\begin{aligned} (S_{x_0}; Z) &= \sqrt{(0_x; Z)^2 + (0_x; S_{x_0})^2} = \\ &= \sqrt{E_x^2 + (H_{x_0} - \frac{E_y}{\cos(\frac{\pi}{6})} + \frac{E_x}{\operatorname{tg}(\frac{\pi}{3})})^2} \end{aligned}$$

Подставив в (10) найденную величину отрезка (S_{x_0} ; Z) и учитывая выражение (3) для угла α , определим окончательно радиус R_x .

$$\begin{aligned} R_x &= \sqrt{E_x^2 + (H_{x_0} - \frac{E_y}{\cos(\frac{\pi}{6})} + \frac{E_x}{\operatorname{tg}(\frac{\pi}{3})})^2} * \\ &* \sin \frac{1}{2} (\operatorname{arctg} \frac{X_2}{H_x} - \operatorname{arctg} \frac{X_1}{H_x}) \end{aligned} \quad (11)$$

Аналогично:

$$\begin{aligned} R_y &= \sqrt{E_y^2 + (H_{y_0} - \frac{E_x}{\cos(\frac{\pi}{6})} + \frac{E_y}{\operatorname{tg}(\frac{\pi}{3})})^2} * \\ &* \sin \frac{1}{2} (\operatorname{arctg} \frac{Y_2}{H_y} - \operatorname{arctg} \frac{Y_1}{H_y}) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} R_z &= \sqrt{E_z^2 + (H_{z_0} + \frac{E_x}{\cos(\frac{\pi}{6})} + \frac{E_z}{\operatorname{tg}(\frac{\pi}{3})})^2} * \\ &* \sin \frac{1}{2} (\operatorname{arctg} \frac{Z_2}{H_z} - \operatorname{arctg} \frac{Z_1}{H_z}) \end{aligned} \quad (13)$$

Зная величины радиусов R_x и R_y можно определить средний радиус объекта R_{cp} и овальность OB .

$$R_{cp} = \frac{|R_x| + |R_y| + |R_z|}{3}; \quad OB = (R_{max} - R_{min}) \quad (14)$$

АПРОБАЦИЯ МЕТОДА

Для проверки предложенных выше выражений (11–13) было произведено компьютерное моделирование трёхкоординатного оптического преобразователя для измерения диаметра цилиндрических изделий. Компьютерная модель в соответствии с рисунком 2 содержала три идентичных измерительных канала повернутых друг относительно друга на угол 120° . 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 $H_{x_0} = H_{y_0} = H_{z_0} = 220$ (мм).

Такие значения геометрических параметров первичного преобразователя являются типичными для получения зоны измерения достаточной для большинства применений. Длина рабочей поверхности многоэлементных приёмников в такой модели не превышает 100 мм. Все начальные геометрические параметры, а также виртуальные положения теней на плоскостях приёмников излучения по соответствующим каналам (рисунок 2) X_1 , X_2 , Y_1 , Y_2 , Z_1 и Z_2 , были определены в компьютерной модели с погрешностью ≈ 1 мкм. Для проверки были смоделированы

РАСЧЕТ ДИАМЕТРА В БЕСКОНТАКТНЫХ ТРЁХКООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЯХ

круглые объекты с различным диаметром и различным расположением в виртуальной зоне измерения. При подстановке полученных при моделировании значений в выражения (11–13) были рассчитаны значения диа-

метров 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 таблице 1.

Таблица 1

Значения диаметров погрешности по осям полученных при компьютерном моделировании							
Измеряемый диаметр D (мм)	Диаметр D_x (мм)	Погрешность ΔD_x (мкм)	Диаметр D_y (мм)	Погрешность ΔD_y (мкм)	Диаметр D_z (мм)	Погрешность ΔD_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

Абсолютная погрешность расчёта диаметра по измерительным осям ΔD_x , ΔD_y и ΔD_z , а также средняя погрешность $\Delta D_{ср}$ 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 [10] приведены механизмы решения данной проблемы.

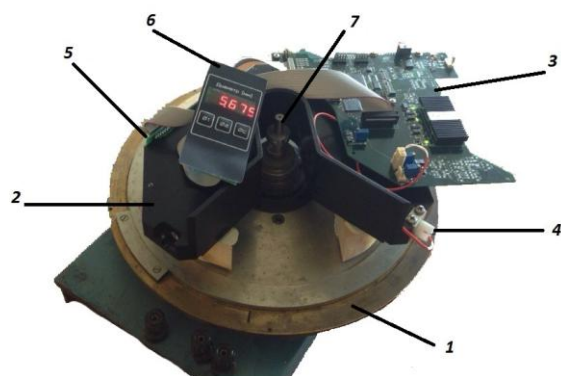


Рисунок 3 – Экспериментальная установка, состоящая из: 1 – поворотный стол, 2 – корпус преобразователя, 3 – управляющая электронная плата, 4 – точечный источник излучения (полупроводниковый лазер), 5 – плата ПЗС приёмника, 6 – индикатор с клавишами управления, 7 – объект с известным диаметром (калибр)

Дальнейшая апробация метода и предложенной математической модели измерения проводилась с использованием реального прототипа измерительного устройства с рас-

ходящемся лазерным пучком. Для упрощения проведения эксперимента в установке был применён первичный измерительный преобразователь от измерителя диаметра «LDM-20» описанного в работе [11]. Внешний вид экспериментальной установки приведён на рисунке 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° 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°, +120° и -120° был экспериментально воспроизведен трёхкоординатный преобразователь, показанный на рисунке 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.

Упрощённая структура электронной схемы установки приведена на рисунке 4. ПЗС матрица линейного типа и точечный источник излучения (полупроводниковый лазер) находятся под управлением программируемой логической матрицы (ППЛМ), генерирующей все необходимые последовательности сигналов. Аналоговые данные с ПЗС приёмника поступают на АЦП, а затем в цифровом виде принимаются программируемой матрицей, где преобразуются в положения фронта и

спада изображения тени, характеризующей линейные размеры измеряемого объекта. Далее измеренные данные по стандартному синхронному интерфейсу SPI передаются на микроконтроллер, который выводит их на светодиодный семисегментный индикатор при нажатии соответствующих управляющих клавиш на клавиатуре. В итоге экспериментально были измерены положения границ тени X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z_1 и Z_2 (рисунок 2) далее, как и в компьютерной модели, с использованием выражений (11–13) были получены расчётные значения для трёх калибров с известным диаметром. Результаты расчёта диаметров и погрешностей их расчёта приведены в таблице 2.

Абсолютная погрешность расчёта диаметра по измерительным осям $\Delta D_x, \Delta D_y$ и ΔD_z , а также средняя погрешность $\Delta D_{ср}$, хоть и незначительно превышает значения полученные при моделировании (таблица 2) всё равно остаётся в пределах 10 мкм. Данный результат очень хорошо согласуется с результатом моделирования. Это дополнительно доказывает верность вывода выражений (11–13) для расчёта диаметра в трёхкоординатных системах. Увеличение погрешности расчётных значений диаметра полученных из экспериментальных данных можно объяснить не идеальностью установки (рисунок 3). Проектирование стойкой к деформа-

ции конструкции трёхкоординатного измерительно преобразователя и применение алгоритмов цифровой обработки данных позволит преодолеть эти проблемы.

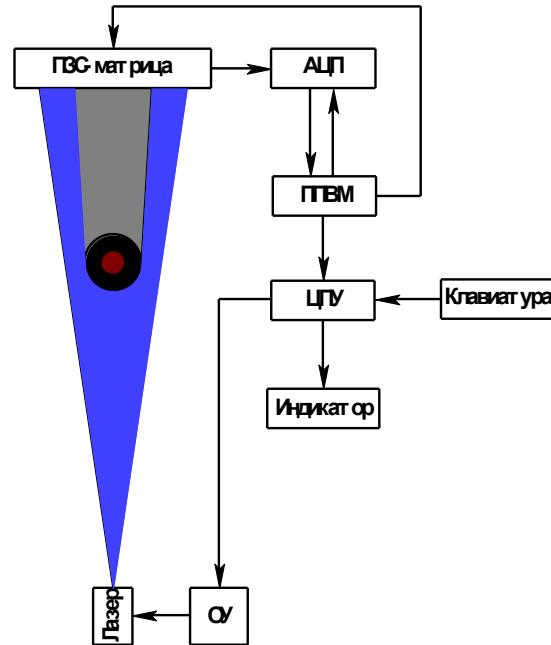


Рисунок 4 – Структурная схема электронной части экспериментальной установки

Таблица 2

Значения диаметров и погрешности по осям полученных экспериментально							
Диаметр калибра D (мм)	Диаметр D_x (мм)	Погрешность ΔD_x (мкм)	Диаметр D_y (мм)	Погрешность ΔD_y (мкм)	Диаметр D_z (мм)	Погрешность ΔD_z (мкм)	Погрешность $\Delta D_{ср}$ (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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен трёхкоординатный метод измерения диаметра в расходящемся лазерном пучке. Получены выражения (9, 11–14), позволяющие рассчитать точное значение радиусов объекта, координаты положения его центра, а также средний радиус и точное значение овальности по максимальному и минимальному значению. Осуществлено компью-

терное моделирование трёхкоординатного преобразователя данные которого хорошо коррелируются с экспериментальных, 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Starikova, N. S. Determination of sensitivity for in-process control of cable product insulation / N. S. Starikova, V. V Redko, G. V Vavilova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Сер. "International Scientific Conference on "Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials", RTEP 2014". – 2015. – С. 012083. – Режим доступа: DOI: 10.1088/1757-899X/81/1/012083.
2. Гольдштейн, А. Е. Измеритель погонной емкости одножильного провода для технологического контроля / А. Е. Гольдштейн, Г. В. Вавилова // Ползуновский вестник. – 2015. – № 3. – С. 38–42.
3. Гольдштейн, А. Е. Электроемкостный измерительный преобразователь для технологического контроля погонной емкости электрического кабеля в процессе производства / А. Е. Гольдштейн, Г. В. Вавилова, В. Ю. Белянков // Дефектология. – 2015. – № 2. – С. 35–43.
4. Goldshtein, A. E. A Mutually Inductive Measuring Transducer of Transverse Displacements of a Rectilinear Conductor / A. E. Goldshtein, E. M Fedorov // Russian journal of nondestructive testing. – 2010. – Vol. 46, № 6. – P. 424–430.
5. Фёдоров, Е. М. Методы и приборы оптического бесконтактного двухкоординатного контроля диаметра и овальности электрических кабелей в процессе их производства / Е. М. Фёдоров, А. Е. Гольдштейн, В. В. Редько // Ползуновский вестник. – 2010. – № 2. – С. 141–149.
6. Fedorov, E. M. Monitoring of the outer diameter of long items using the optical diffraction method / E. M. Fedorov, I. D. Bortnikov // Technical Physics. – 2015. – Vol. 60, Is. 11. – P. 1689–1692.
7. Red'ko, V. V. Problems of Automatic Test of In-

ulation in Cable Production / V. V. Red'ko, A. P. Leonov, L. A. Red'ko, V. A. Bolgova // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 671, № 1. – P. 012049.

8. Chursin, Y. A. Methods of resolution enhancement of laser diameter measuring instruments / Y. A. Chursin, E. M. Fedorov // Optics & Laser Technology. – 2015. – Vol. 67. – P. 86–92.

9. Свендровский, А. Р. Расчёт диаметра в бесконтактных двухкоординатных измерителях / А. Р. Свендровский // I всероссийская конференция Научно-технические проблемы приборостроения и машиностроения. – Томск, 2005. – С. 31–33.

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

11. Фёдоров, Е. М. Двухкоординатный лазерный измеритель диаметра кабеля на основе оптического дифракционного метода / Е. М. Фёдоров, А. Е. Гольдштейн // Ползуновский вестник – 2015. – № 1. – С. 86–91.

Фёдоров Евгений Михайлович, к.т.н., доцент кафедры Физических методов и приборов контроля качества, института Неразрушающего контроля НИТПУ, тел.: 41-73-07, e-mail: evgeny_fyodorov@list.ru.

Коба Александр Александрович, магистрант кафедры Физических методов и приборов контроля качества, института Неразрушающего контроля НИТПУ, тел.: 9138047084, e-mail: koba_AA@mail.ru.