

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ КАНАЛОВ СТВОЛОВ НАРЕЗНОГО ОРУЖИЯ

Пётр Сергеевич Завьялов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, директор, тел. (383)306-62-24, e-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru

Дмитрий Радионович Хакимов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, инженер, тел. (383)306-59-40, e-mail: baita@mail.ru

Анна Александровна Гущина

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, ведущий программист, тел. (383)306-59-40, e-mail: agushchina@tdisie.nsc.ru

Алексей Владимирович Ермоленко

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, начальник отдела, тел. (383)306-59-40, e-mail: eralex@gmail.com

Дмитрий Владимирович Скоков

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, начальник отдела, тел. (383)306-59-40, e-mail: 15823@mail.ru

Владимир Юрьевич Сартаков

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, ведущий инженер, тел. (383)306-59-40, e-mail: vlusart@ngs.ru

В статье обсуждаются вопросы разработки системы бесконтактного контроля прямолинейности каналов стволов нарезного оружия на основе метода структурного освещения. Разработан компактный оптический зонд, в котором для освещения канала ствола используется дифракционный оптический элемент (ДОЭ). Предложены и разработаны алгоритмы обработки изображений, получаемых при сканировании канала ствола, по которым затем восстанавливается 3D-форма контролируемого изделия. Приведены результаты испытаний системы контроля прямолинейности на образцах реальной продукции. В результате испытаний получена погрешность измерений отклонений прямолинейности на уровне ± 4 мкм.

Ключевые слова: метод структурного освещения, дифракционный оптический элемент, контроль прямолинейности, обработка изображений.

DEVELOPMENT OF A STRAIGHTNESS INSPECTION SYSTEM OF THE RIFLED GUNS CHANNELS

Petr S. Zavyalov

Technological Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russian St., Novosibirsk, 630058, Russia, Ph. D., Director, phone: (383)306-62-24, e-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru

Dmitry R. Khakimov

Technological Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russian St., Novosibirsk, 630058, Russia, Engineer, phone: (383)306-62-24, e-mail: baita@mail.ru

Anna A. Guschina

Technological Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russian St., Novosibirsk, 630058, Russia, Leading Programmer, phone: (383)306-62-24, e-mail: agushchina@tdisie.nsc.ru

Aleksey V. Ermolenko

Technological Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russian St., Novosibirsk, 630058, Russia, Head of Department, phone: (383)306-62-24, e-mail: eralex@gmail.com

Dmitry V. Skokov

Technological Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russian St., Novosibirsk, 630058, Russia, Head of Department, phone: (383)306-62-24, e-mail: 15823@mail.ru

Vladimir Yu. Sartakov

Technological Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russian St., Novosibirsk, 630058, Russia, Leading Engineer, phone: (383)306-62-24, e-mail: vlusart@ngs.ru

The article discusses the development of a non-contact straightness inspection system of the rifled guns channels based on the structured light method. A compact optical probe has been developed, in which a diffractive optical element (DOE) is used to illuminate the bore. Algorithms for processing a series of images obtained by scanning a bore are proposed and developed. In the issue of image processing 3D form of the controlled product is reconstructed. The test results of the straightness inspection system on real samples are presented. As a result of the tests, the error of measurements of straightness deviations at the level of ± 4 microns was obtained.

Key words: structured light method, diffractive optical element, straightness inspection, image processing.

Введение

Непрямолинейность канала ствола стрелкового оружия явление довольно частое, возникающее не только при деформациях готового ствола, но и в процессе его изготовления. Данное явление крайне нежелательно, так как при незначительном пологом изгибе ствола ухудшается кучность боя, а при значительном ствол может разорвать.

При производстве стволов оружия на разных стадиях производится операция их правки, в процессе которой добиваются минимальных значений отклонений от прямолинейности оси канала ствола (соответствие допуску). При этом зачастую для контроля непрямолинейности используется визуальный метод «по тени» [1], когда правщик через зеркальное отражение от стенки канала наблюдает за границей света и тени. Вращая ствол, он по форме тени опреде-

ляет места искривления. И тут же производит их правку на прессе или ударным инструментом.

Эта технология возникла еще на заре производства огнестрельного оружия и применяется до сих пор. Её основным недостатком является субъективность контроля, при котором результат напрямую зависит от квалификации и состояния правщика. К тому же при производстве высокоточного снайперского оружия этот визуальный метод работает уже на пределе своей чувствительности.

В последнее время стали появляться оптико-электронные методы и устройства для непосредственного измерения геометрических параметров протяженных отверстий. В основном измерения основываются на автоколлимационном методе [2], или слежении за лазерным лучом [3], задающим виртуальную ось. Большинство предложенных методов предполагают использование зонда, контактирующего с контролируемым каналом. Зонд центрируется и проталкивается через ствол. Это обстоятельство снижает точность измерений таких методов (погрешность более 10 мкм). При этом диапазон контролируемых диаметров начинается от 20–30 мм, что не позволяет их применять для контроля стрелкового оружия.

Метод контроля геометрических параметров отверстий на базе ДОЭ

В работах [4,5] нами был предложен оптико-электронный метод контроля отверстий с использованием дифракционного фокусатора в кольцо. На основе данного метода может быть создан малогабаритный зонд для контроля диаметров отверстий, непрямолинейности его оси, отклонения формы поверхности от цилиндричности.

Методика измерения заключается в формировании освещённого участка в виде узкого кольца на внутренней поверхности изделия, приёме и обработке изображения этого участка. Свет, рассеянный от внутренней поверхности объекта, попадает на матрицу камеры благодаря коническому зеркалу. Сканирование всей поверхности осуществляется посредством перемещения объекта вдоль оси (рис. 1).

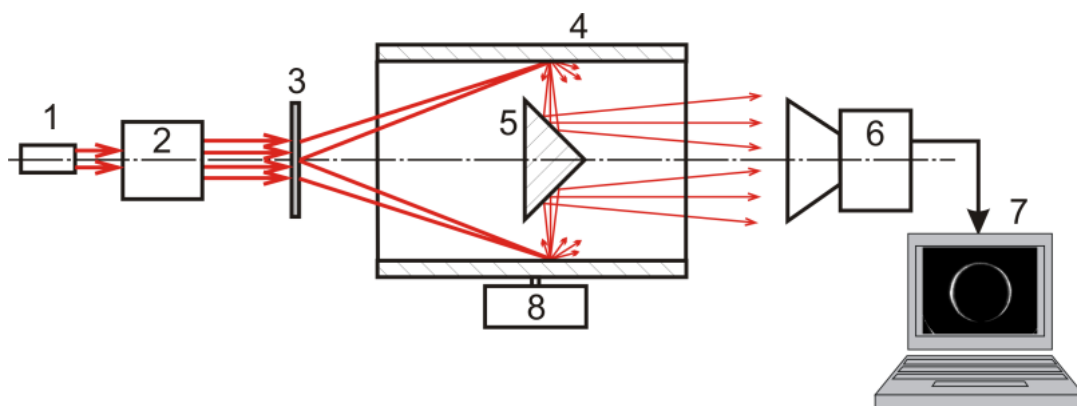


Рис. 1. Принцип контроля отверстий:

1 – лазер; 2 – коллиматор; 3 – ДОЭ; 4 – цилиндрический канал; 5 – коническое зеркало; 6 – камера; 7 – компьютер; 8 – устройство перемещения детали

В предлагаемом методе измерения важнейшей задачей является фокусировка светового пучка в узкое кольцо (рис. 2). В качестве такого оптического элемента был использован дифракционный фокусатор [5], со следующей фазовой функцией [6]:

$$\varphi(r) = -k\sqrt{f_0^2 + (r - r_0)^2}, \quad 0 \leq r \leq a, \quad (1)$$

где r – полярный радиус, f_0 – фокусное расстояние, a – радиус фокусатора, r_0 – радиус кольца фокусировки.

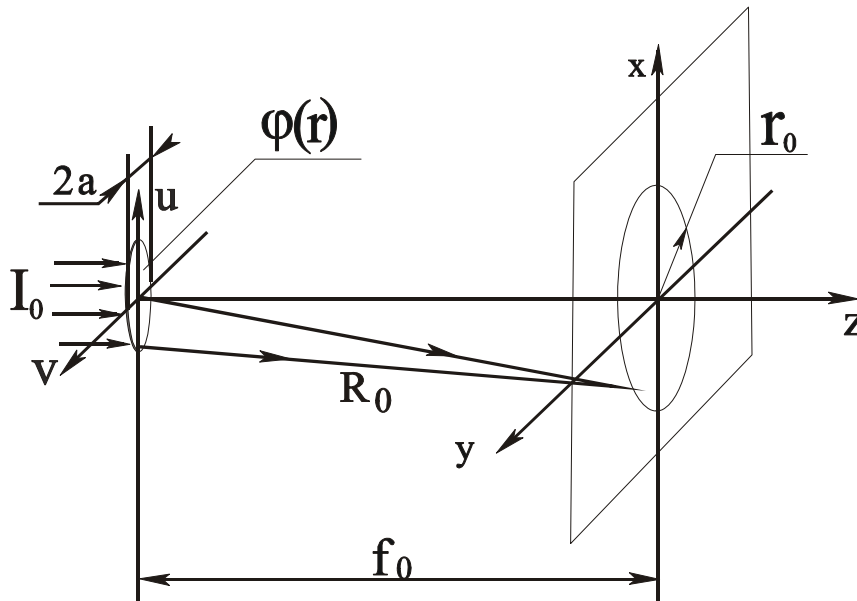


Рис. 2. Геометрия фокусировки в кольцо

Использование ДОЭ позволяет добиться высокой точности измерений и минимизации габаритов оптической схемы зонда.

Разработка зонда для 3D-сканирования отверстий

Разработана конструкция компактного зонда для бесконтактного контроля протяженных отверстий (рис. 3). В качестве источника света используется полупроводниковый лазер с волоконным выходом (длина волны 660 нм, мощность 80 мВт). Для введения излучения в зонд используется волоконный кабель 1, который прокладывается внутри и снаружи зонда и выводится в его центр - на оптическую ось. Расходящийся лазерный пучок коллимируется сферическим зеркалом 4 и освещает ДОЭ 3. Далее излучение выходит через окна 6 в корпусе зонда и попадает на контролируемое отверстие, формируя на его поверхности узкое световое кольцо. Наблюдение за освещенной поверхностью производится с помощью конического зеркала 5, линзы 7 и эндоскопа 8. Корпус зонда выполнен в виде трубки диаметром 10 мм и длиной более 1 м.

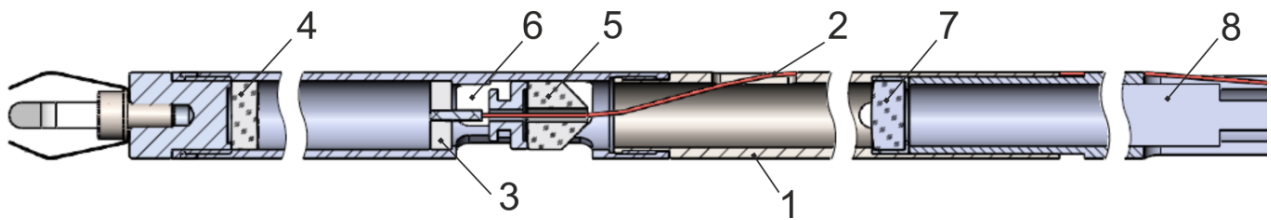


Рис. 3. Конструкция зонда:

1 – корпус, 2 – оптоволокно, 3 – ДООЭ, 4 – сферическое зеркало, 5 – коническое зеркало, 6 – окна в корпусе зонда, 7 - линза, 8 - эндоскоп

Разработанная оптическая схема зонда имеет высокую чувствительность к изменению геометрии контролируемого канала (около 4 мкм на 1 пиксель изображения) и позволяет сканировать отверстия диаметром от 12,6 до 13,2 мм. На рис. 4 приведены регистрируемые изображения канала ствола.

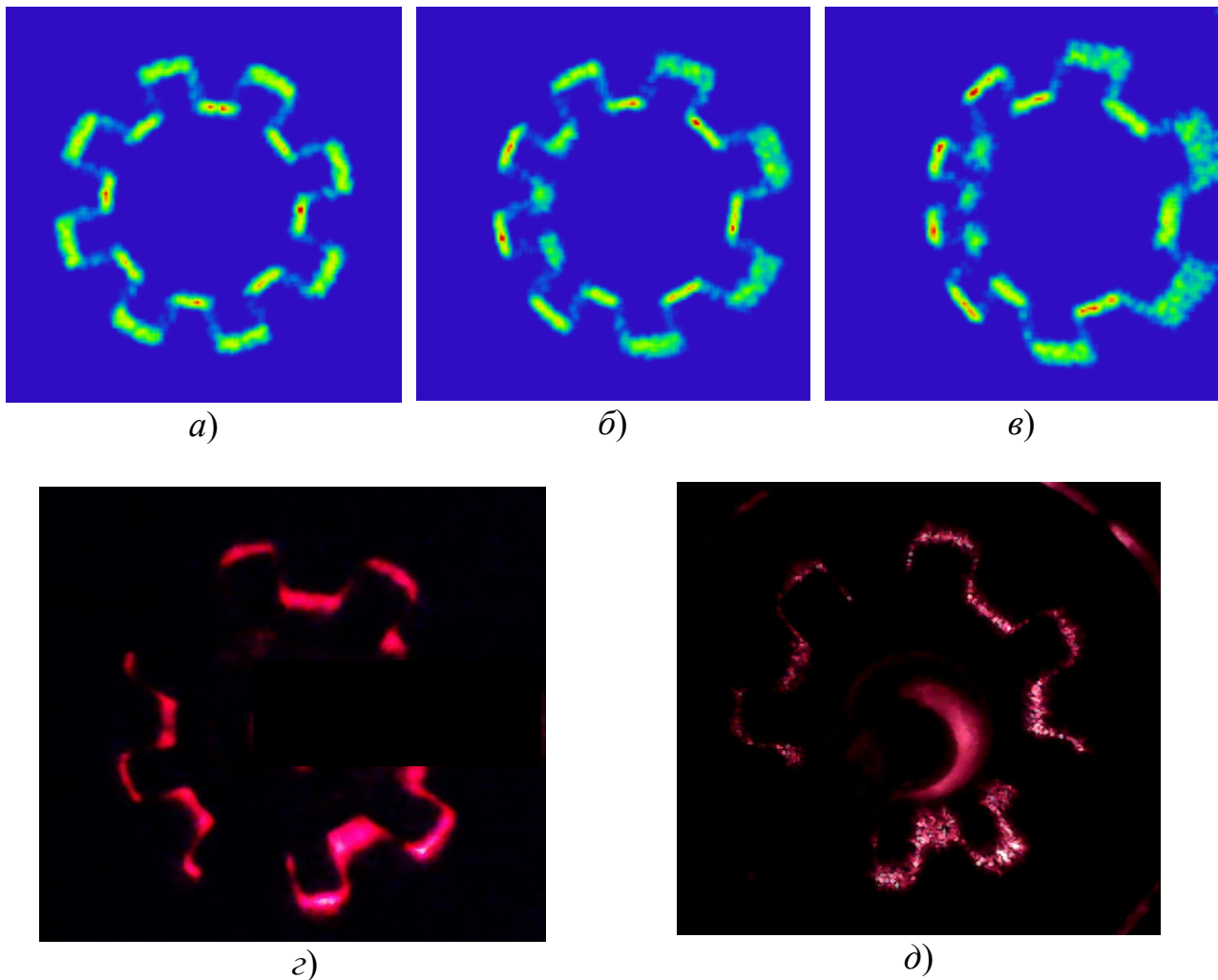


Рис. 4. Изображения кольцевой метки:

a), б), в) изображения, полученные путем моделирования при различных смещениях оси ствола (0; 0,1; 0,2 мм соответственно); *г)* реальное изображение при сканировании ствола; *д)* изображение кольцевой метки на стволе в статике

Для иллюстрации работы метода было проведено моделирование работы оптической системы зонда в непоследовательном режиме программного пакета Zemax. На рис. 4, а–в показано, как ведет себя изображение кольцевой метки при смещении (от 0 до 0,2 мм) оси канала нарезного ствола. Видно, что в несмещенном положении изображение представляет собой две концентрические сегментированные окружности разного диаметра. При смещении оси отверстия изображение кольцевой метки также смещается, и происходит её искажение. Путем соответствующей математической обработки можно вычислить как положение оси, так и диаметр, и овальность контролируемого канала [7, 8].

На рис. 4, г приведено реальное изображение кольцевой метки, полученное в процессе сканирования канала нарезного ствола. Видны три области, в которых метка экранируется на деталях корпуса зонда. Так как съемка осуществляется в движении спекл-шум на изображении не виден. Для сравнения на рис. 4, д приведено такое же изображение в статичном положении.

Установка для контроля прямолинейности канала ствола

В рамках работ с одним из оборонных предприятий РФ разработана, изготовлена и поставлена заказчику Установка для контроля прямолинейности канала ствола (шифр «Струна») (рис. 5).



Рис. 5. Общий вид установки «Струна»: 1 – линейный привод, 2 – блок оптический, 3 – рама, 4 – стойка управления, 5 – блок электроники, 6 – основание, 7 – опора

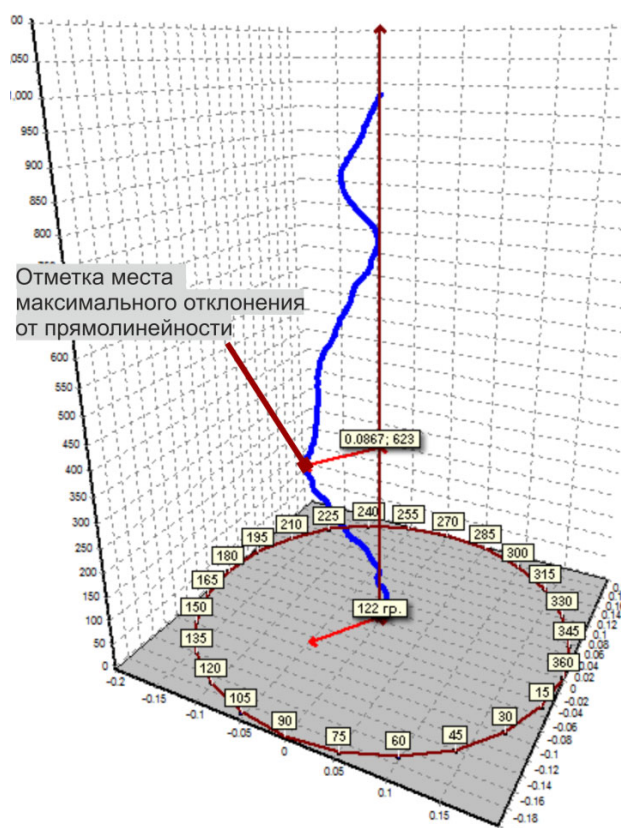


Рис. 6. Результаты сканирования канала ствола – 3D визуализация формы оси

Технические характеристики установки:

- контролируемые параметры:
- отклонение от прямолинейности оси канала ствола,
- диаметр;
- частота измерений – через каждые 2 мм;
- диаметр контролируемого канала 12,6÷13,2 мм;
- длина контролируемого участка - до 1200 мм;
- контролируемое отклонение от прямолинейности - до 0,35 мм;
- погрешность измерения геометрических параметров $\pm 0,004$ мм;
- время контроля одного изделия < 2 мин.

Было разработано программное обеспечение для установки «Струна», осуществляющее общее управление оборудованием и производящее обработку получаемых изображений кольцевой метки с последующим вычислением геометрических параметров измеряемых каналов.

В процессе измерения контролируемый ствол устанавливается вертикально и зажимается пневматическими центрирующими захватами. Затем производится его перемещение вверх по прецизионным направляющим. При этом зонд входит внутрь контролируемого канала и производит его сканирование световым кольцом по всей длине. За одно измерение регистрируется и обрабатывается порядка 300 изображений разрешением 640x480 пикс., по каждому из которых определяются отклонение оси отверстия и диаметр сечения. Результаты измерений выводятся оператору в виде 3D кривой, иллюстрирующей искривление оси канала. При этом указывается величина и координаты (по длине и углу) наибольшего отклонения оси. Эти данные используются затем для правки изделий с помощью специального прессы.

Были проведены испытания установки на образцах реальных стволов. В процессе испытаний проверялась повторяемость измерений. Для этого проводились многократные измерения изделий с поворотом по углу. В итоге повторяемость измерений составила ± 4 мкм.

Для общей оценки правильности измерений установки были проведены измерения изделий с намеренно внесенными искривлениями оси каналов. По показаниям установки проводилась последующая правка стволов под прессом. В результате удалось снизить искривление оси с величин 0,04 – 0,1 мм на базе 300 мм, до величин менее 0,02 мм. Проверка производилась проходными калибрами длиной 300 мм и диаметром меньше диаметра канала на соответствующую величину (0,01, 0,02, 0,03 мм). В настоящее время установка «Струна» находится в стадии внедрения на одном из оборонных предприятий РФ. Подана заявка и получен патент на изобретение [9].

Заключение

Разработана и изготовлена лазерная установка для бесконтактного автоматизированного контроля геометрических параметров каналов стволов нарезного стрелкового оружия.

В основу работы системы положен метод структурного освещения контролируемой поверхности световым кольцом, формируемым прецизионным дифракционным элементом. В установке применяется оригинальная оптическая схема в виде компактного зонда. Погрешность измерения геометрических параметров $\pm 0,004$ мм. В процессе измерения зонд вводится внутрь контролируемого канала и производится его 3D сканирование по всей длине. Установка используется для производственного контроля прямолинейности стволов нарезного оружия на разных стадиях их изготовления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов А. Д. Правка ружейных стволов. Теория и практика выпрямления погнутостей в гладких и нарезных стволах по теням их каналов. – М., 1928.
2. ZHOU Ren-bin, XIE Tie-bang. Measurement for Non-straightness and Muzzle Angle of Artillery Barrel Based on Laser Collimation Technology. 3rd International Symposium on Instrumentation Science and Technology Aug. 18~22, 2004, Xi'an, China. P. 2-0753 - 2-0753.
3. Соколов А. В., Вяткин М. Д., Головизнина Т. В., Спешков В. Г., Поляков В. Б., Шендеров И. Б., Дровнин М. И. Оптико-электронная система контроля прямолинейности глубоких отверстий // Практика приборостроения. 2002. – № 1. – С. 19-21.
4. Пат. 2245516 Российская Федерация, МПК7 G 01 C 11/30. Устройство контроля отверстий деталей / Ю. В. Чугуй, Л. В. Финогенов, П. С. Завьялов, В. Г. Никитин, А. Р. Саметов; заявитель и патентообладатель Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН.
5. Using diffractive optical elements for industrial products geometrical parameters inspection. P S Zavyalov, L V Finogenov, E S Zhimuleva, M S Kravchenko, D R Khakimov, K I Savinov, M V Savchenko, A V Beloborodov and V E Karlin. Journal of Physics: Conference Series, Volume 1096, Number 1. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1096/1/012009>.
6. Сойфер В. А. Методы компьютерной оптики / Ред. В. А. Сойфер. – М. : Физматлит, 2000. – 688 с.
7. Финогенов Л. В. Контроль геометрических параметров отверстий с использованием дифракционного кольцевого фокусатора. Автометрия. 2005. № 6. С. 23-31.
8. Inspection of holes parameters using a ring diffractive focuser / Yu. Chugui, L. Finogenov, V. Kiryanov, V. Nikitin, A. Sametov, P. Zavyalov // Photonics in Measurement: [Proc.], 23-24 June 2004, Frankfurt. – Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2004. – P. 433-443. – (VDI-Berichte; № 1844).
9. Заявка на изобретение № 2019117493/28. Устройство для контроля отверстий деталей / заявитель Конструкт.-технол. ин-т научн. приборостр. СО РАН. – № 2019117493/28; заявл. 05.06.2019

© П. С. Завьялов, Д. Р. Хакимов, А. А. Гуцина, А. В. Ермоленко,
Д. В. Скоков, В. Ю. Сартаков, 2020