

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ ТОКОПОДВОДЯЩИХ СТЕРЖНЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ С САМООБЖИГАЮЩИМСЯ АНОДОМ

© 2020 г. А.И. Потапов^{1,*}, А.А. Кульчицкий^{1,**}, Я.Г. Смородинский^{2,3,***}, А.Г. Смирнов^{1,****}

¹Санкт-Петербургский горный университет, Россия 119106 Санкт-Петербург,
Васильевский остров, 21, линия 2

²ИФМ УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

³Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19

E-mail: *apot@mail.ru; **doz-ku@rambler.ru; ***sm@imp.uran.ru; ****sztu1522@gmail.com

Поступила в редакцию 09.12.2019; после доработки 19.01.2020

Принята к публикации

Рассматривается проблема автоматизированной диагностики состояния анодного стального штыря электролизера Содерберга с верхним подводом тока, который является основным элементом токоподвода металлургического агрегата. Предложено бесконтактно контролировать форму и размеры рабочей части токоподводящего штыря с использованием цифровых камер. Изображения сечений токоподводящего штыря, сделанные в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, позволяют оценить его форму и размеры.

Рассматривается возможность применения цифровых камер с разрешением 2 и 5 Мрх в качестве устройств регистрации. Выделены составляющие погрешности системы контроля токоподводящих стержней, расположенной вне электролизного цеха, на участке очистки стержней. Основное внимание уделено анализу инструментальных погрешностей системы. Рассмотрены возможные компоновки системы контроля и описан метод компенсации основной составляющей погрешности в нетелецентрических оптических системах — погрешности позиционирования.

Ключевые слова: контроль геометрических параметров стержней, нетелецентрическая оптика, контроль токоподводящих штырей, погрешности системы с нетелецентрической оптикой.

DOI: 10.31857/S0130308220030070

ВВЕДЕНИЕ

Ограниченное количество управляющих (ток серии, межполюсное расстояние и подача глинозема) и оперативно контролируемых параметров электролизеров Содерберга (рабочее напряжение на ваннах) для обеспечения заданного качества управления требует стабилизации условий функционирования [1, 2]. Геометрические параметры токоподводящих штырей (форма и размеры) оказывают влияние на сопротивление токоподводящего тракта и ведут к отклонениям как в работе отдельного электролизера, так и серии в целом. Использование применяемых в настоящее время методов контроля по шаблонам, с помощью универсальных средств измерений (линеек) или по весу, отличается низкой точностью, большим влиянием субъективных факторов и не обеспечивает возможности оценки наблюдения за динамикой изменения их размеров для решения задач диагностики функционирования оборудования. Разработка и внедрение такой автоматизированной системы на электролизных производствах с использованием технологического крана с ЧПУ позволило бы решить данные задачи.

В работе [3] показано, что размещение системы контроля на технологическом крайне нецелесообразно, поскольку не позволяет совместить задачи контроля геометрии токоподводящего штыря и обеспечения требуемой точности установки на заданный горизонт. Соответственно, эти задачи следует разделить, и производить контроль и отбраковку непригодных для дальнейшего использования штырей на участке очистки штырей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Определим основные требования к системе контроля. Система должна осуществлять автоматическое бесконтактное измерение длины анодного штыря (рис. 1а) с точностью ± 1 мм и диаметра штыря (100 мм) в нижней части (контроль предельного износа) с точностью ± 1 мм и выдачу сигнала об отбраковке штыря. Исходя из размеров зоны интенсивного износа токоподводящего штыря, представленной на рис. 1б, область контроля будем считать равной 400×300 мм. Достоверность определения геометрических параметров анодного токоподводящего штыря должна быть не менее 95 % (не более 5 % ошибочных измерений или ошибок распознавания объекта).

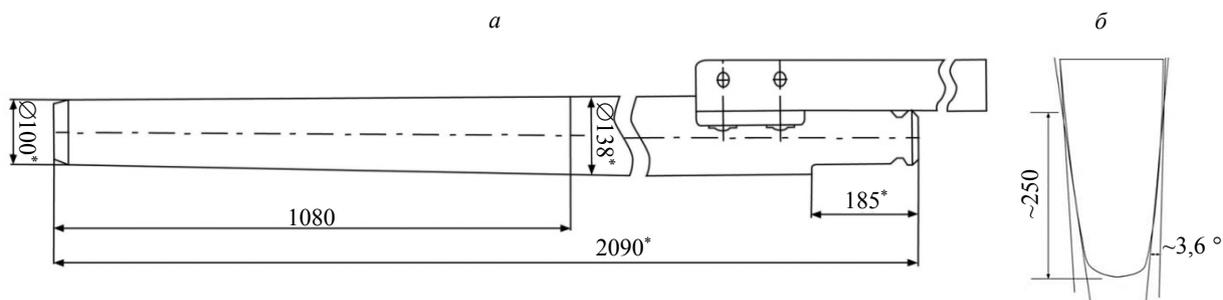


Рис. 1. Основные размеры (а) и область контроля износа (б) токоподводящего штыря при эксплуатации.

Требуемую точность измерения при заданных размерах области контроля возможно обеспечить использованием контактного измерения на координатно-измерительных машинах [4, 5] или применением средств бесконтактного оптического неразрушающего контроля [6, 7]. Использование первого нецелесообразно вследствие высокой стоимости оборудования при сравнительно низкой скорости измерения и избыточной точности контроля. Реализация бесконтактного оптического метода возможно путем 3D-сканирования [8] или реализации проекционного метода контроля сечений. Использование 3D-сканирования требует достаточно дорогостоящего оборудования и имеет ограничение по работе с материалами, имеющими явно выраженную зеркальную составляющую в индикатрисе рассеяния, поэтому будем рассматривать реализацию проекционного метода.

Использование телецентрических систем [9] для данных размеров объекта контроля нецелесообразно в связи с высокой стоимостью, избыточной точностью, ограничением поля зрения (до 250 мм) и требованием контроля в проходящем свете.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценим погрешности одноканальной пассивной системы контроля [10] при ее стационарном размещении на участке очистки штырей. Оптическая система, использованная для контроля, показана на рис. 2. На схеме показано положение плоскости P , в которой контролируется размер стержня D . В пространстве изображений матрица цифровой камеры обозначена P' .

Основные факторы, влияющие на точность определения геометрии токоподводящего штыря одноканальной пассивной системой контроля:

- 1) разрешение цифровой камеры;
- 2) аберрации оптической системы;
- 3) позиционирования штыря относительно цифровой камеры;
- 4) проекционная погрешность нетелецентрического объектива;
- 5) погрешность от фоновой засветки;
- 6) погрешность отражения от поверхности объекта;
- 7) погрешность рефракция оптической среды в цеховых условиях.

Исходя из поля зрения и требований по точности контроля, минимальное разрешение цифровой камеры для регистрации изображений должно быть не менее 1600×1200 px, что соответствует матрице размером в 2 МРх. Исходя из данного значения, для оценки значений погрешностей измерений будем рассматривать камеры с разрешением 2 и 5 МРх.

Для компенсации аберраций оптической системы проводят калибровку цифровых камер по тест-объекту [11,12]. Особенностью калибровки систем контроля тел вращения является то, что следует обеспечить перпендикулярность тест-объекта оптической оси объектива, поскольку его поворот относительно оси симметрии контролируемого объекта (показанный на рис. 2 плоскостью P_1) вызовет проекционную ошибку [13], величину которой можно оценить выражением:

$$\Delta_k = D \cdot (1 - \cos\beta),$$

где β — угол наклона тест-объекта, D — диаметр стержня.

Если задаться относительной точностью процедуры калибровки в 1 px (0,05 % для рассматриваемого минимального разрешения цифровой камеры), допустимыми будут угловые отклонения тест-объекта до 1° .

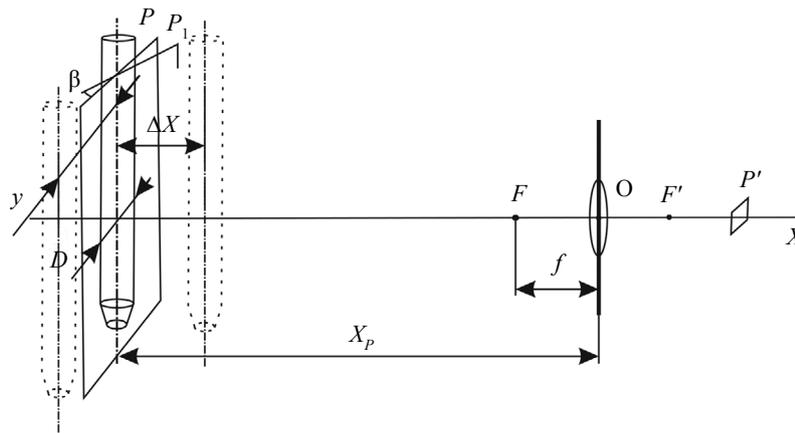


Рис. 2. Схема одноканальной пассивной системы контроля.

При смещении контролируемого объекта в плоскости калибровки перпендикулярно его оси симметрии на y происходит поворот изображения на угол α :

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{y}{X_p - l} \right),$$

где X_p — расстояния до плоскости контроля P (для рассматриваемых камер 2 и 5 МРх с объективами $f = 25$ мм составляет 865 и 1208 соответственно), l — смещение видимого изображения нетелецентрической оптикой вдоль оптической оси, которое может быть вычислено по формуле:

$$l = \frac{D^2}{4 \cdot (X_p - f)},$$

где f — фокусное расстояние объектива.

Однако при этом ход вспомогательных лучей, проходящих через точку фокуса F , не изменяется и соответственно размер изображения уменьшится на

$$\Delta_y = D \cdot (1 - \cos \alpha).$$

Если подставить ранее заданные значения параметров системы контроля, то при отклонении менее 25 мм погрешность определения размера штыря составит менее 0,05 %.

Проекционная погрешность нетелецентрического объектива [13] (от смещения видимого изображения сечения тела вращения относительно оси симметрии) с $f = 25$ мм при имеющихся отношениях размера стержня относительно поля зрения составляет 0,07 %.

Величина смещения контролируемого объекта относительно плоскости калибровки влияет на значение линейного увеличения системы V_p [14]. Линейное увеличение V_p (см. рис. 2) в точке пересечения оптической оси объектива с плоскостью P измерений вычисляется как

$$V_p = \frac{f}{X_p - f}.$$

Погрешность позиционирования штыря при его возможных отклонениях относительно плоскости калибровки ± 20 мм составляет 2,5 % для камеры 2 МРх и 1,8 % для 5 МРх, что при заданных расстояниях X_p дает погрешность в 2,5/1,8 мм соответственно.

Используя результаты вышеприведенных оценок составляющих погрешности и данные [3] представим результаты анализа точности одноканальной пассивной системы контроля токоподводящих штырей в табл. 1.

Результаты анализа показывают, что одноканальная система при стационарном положении объекта контроля не обеспечивает требуемой точности. Основной вклад вносит погрешность позиционирования объекта относительно цифровой камеры.

Для получения достоверной информации о размерах и форме осесимметричного тела необходимо изображение минимум двух сечений. Рассмотрим возможные компоновочные решения

Таблица 1

Погрешности одноканальной пассивной системы контроля

№ п/п	Составляющие погрешности	Относительная величина, % / абсолютная величина, мм	
		Камера 2 Мрх	Камера 5 Мрх
1.	Системы aberrации оптической	± 1 рх / 0,25 мм	± 1 рх / 0,17 мм
2.	Позиционирования объекта относительно цифровой камеры	$\pm 2,5$ % / $\pm 2,5$ мм	1,8 % / $\pm 1,8$ мм
3.	Объекта в плоскости калибровки перпендикулярно его оси симметрии	0,05 % / 0,05 мм	
4.	Проекционная погрешность нетелецентрического объектива	0,07 % / 0,07 мм	
5.	От фоновой засветки	± 1 рх / 0,25 мм	± 1 рх / 0,17 мм
6.	Отражения от поверхности объекта		
7.	Рефракция оптической среды в цеховых условиях	$\pm 0,1$ мм	
	Σ min-max/ СКВ	3,22/2,53	2,36/1,82

системы контроля геометрических параметров токоподводящих стержней, реализующей оптический проекционный метод, с использованием цифровых камер (рис. 3).

Рис. 3а — достаточно распространенная схема контроля осесимметричных тел с одной цифровой камерой и механизмом поворота контролируемого объекта для получения совокупности сечений. Данная схема позволяет реализовать получение изображения детали как в проходящем, так и отраженном свете. Достоинством данной схемы является выбор шага для получения изображений требуемого количества сечений для описания геометрии и поверхностных дефектов с максимально возможной точностью для выбранной системы регистрации изображений. Существуют специальные оптические системы, реализующие данную схему [15]. Закрепления изделия с двух сторон, например в центрах, позволяет минимизировать погрешности установки. Однако наличие второй опоры усложняет систему контроля его размера и ограничивает возможность контроля нижней части токоподводящего стержня, поскольку его фиксация возможна только за наружную поверхность. Использование же консольного закрепления стержня приведет к ошибке определения сопряженных координат в нижней (рабочей) области, вследствие искривлений или неравномерности износа, и, следовательно, смещения центра масс.

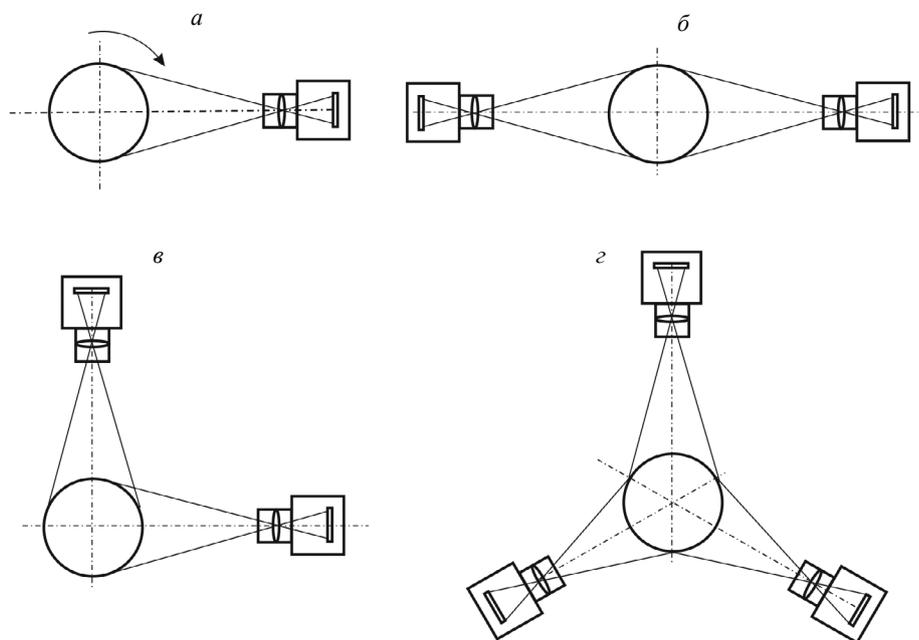


Рис. 3. Схемы контроля осесимметричных тел:
а — с одной камерой; б, в — с двумя камерами; г — с тремя камерами.

Расположение двух камер на одной оси (рис. 3б) позволяет получить изображение практически всей поверхности штыря. При симметричном расположении камер относительно калибровочной плоскости поправку на смещение стержня вдоль оптической оси при контроле геометрических размеров стержня можно вычислять по результатам калибровки как среднее значение размера, полученного с двух камер. Однако такое расположение камер не позволяет контролировать форму изделия и компенсировать наклон относительно калибровочной плоскости.

Схема 3в, применительно к контролю кабельной продукции, рассмотрена в [14], однако в работе не решены проблемы с калибровкой цифровых камер с нетелецентрической оптикой в пространстве изображений. Схема позволяет получить изображение осесимметричного тела в двух взаимно перпендикулярных сечениях, что дает возможность судить о форме и основных размерах. Недостатком данной компоновки является выпадение четверти площади поверхности объекта из поля зрения. Достоинством данной компоновки является простая реализация компенсации смещения объекта (как линейного, так и углового) в пределах поля зрения.

Схема 3г позволяет компенсировать недостатки схем 3б и 3в и производить как контроль поверхностных дефектов, так и формы с компенсацией изменения положения стержня по угловым и линейным координатам. Однако такое расположение камер требует более высокой культуры обслуживания установки контроля, и система получается в полтора раза более дорогостоящей, а алгоритмы более сложными.

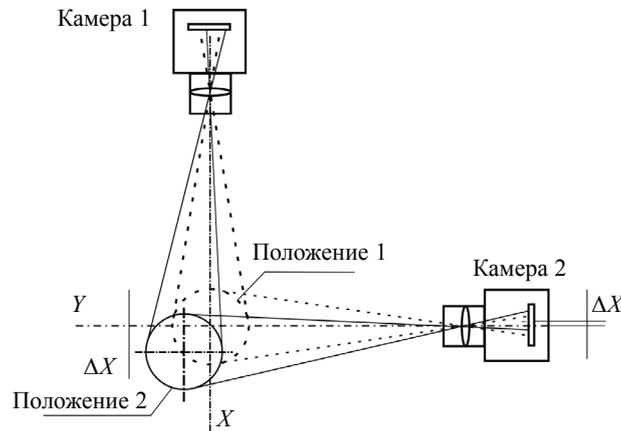


Рис. 4. Определения погрешности позиционирования.

На основе сравнительного анализа схем компоновки и исходя из требований к системе контроля остановимся на решении, показанном на рис. 3в. Данная схема позволяет учесть и скомпенсировать доминирующую составляющую погрешности определения размеров токоподводящего стержня (см. табл. 1) — позиционирования объекта относительно цифровой камеры. На рис. 4 под «Положение 1» определена позиция стержня, для которой проводилась процедура калибровки, а под «Положение 2» — его произвольное положение при производственном контроле.

Относительное изменение линейного увеличения можно вычислить по формуле

$$\delta V_p = \frac{X_{p1} - f}{X_p - f} = \frac{X_p \pm \Delta X - f}{X_p - f},$$

где ΔX — смещение контролируемого стержня вдоль оптической оси относительно плоскости, в которой проводилась калибровка первой камеры (см. рис. 4). Оценка величины δV_p обеспечивается за счет того, что величина смещения вдоль оптической оси относительно плоскости, в которой проводилась калибровка первой камеры, вычисляется по изображению со второй камерой.

Введение поправочного коэффициента на основе данной зависимости позволит компенсировать основную составляющую погрешности определения размеров стержня. Данная методика не позволяет полностью скомпенсировать данную погрешность из-за возникающей ошибки определения положения стержня (для рассматриваемых камер 1,8—2,5 %). Некompенсированная погрешность определения диаметра штыря σD для смещений в пределах ± 5 % от расстояния X_p

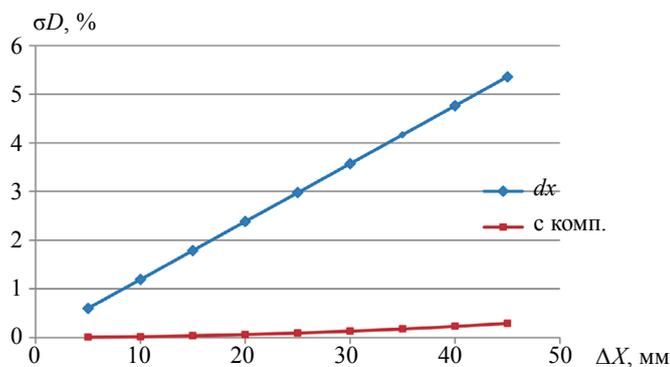


Рис. 5. Графики ошибок определения линейных размеров без компенсации и с компенсацией для камеры 5 МРх.

до плоскости контроля не превысит 0,06 и 0,03 % для камер 2 и 5 МРх соответственно (рис. 5). Это позволит получить максимальную ошибку определения длины 0,88/ 0,62 мм и 0,73/ 0,53 мм диаметра стержня для камер 2 и 5 МРх соответственно и отвечает заданным требованиям к точности их контроля.

Аналогично определяется погрешность и для другой камеры по оси Y .

При использовании объективов с меньшим фокусным расстоянием, требования по точности позиционирования тест-объекта возрастает, увеличивается и вклад перспективной ошибки при определении диаметра стержня. Для обеспечения заданной точности контроля проекционную ошибку можно компенсировать корректирующим коэффициентом.

Уменьшение погрешностей фоновой засветки и отражения от поверхности объекта возможно за счет применения более совершенных методик выделения объектов контроля на изображении [17].

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали возможность автоматического контроля геометрии анодных штырей с точностью ± 1 мм системой из двух цифровых камер, оптические оси которых пересекаются под углом $90 \pm 1^\circ$. Для этого точность позиционирования тест-объекта при проведении процедуры калибровки по угловым отклонениям не должна превышать 1° , по линейным смещениям $\pm 1/2$ мм при использовании камер с разрешением 2 и 5 МРх соответственно и объективами с $f = 25$ мм.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минцис М.Я. Автоматическое регулирование алюминиевых электролизеров. М.: Metallurgia, 1971. 89 с.
2. Beloglazov I.I., Petrov P.A., Gorlenkov D.V. Development of an algorithm for control metallurgical processes of fluidized roasting using an adaptive controller // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1059. № 1. DOI: 10.1088/1742-6596/1059/1/012015
3. Бажин В.Ю., Кульчицкий А.А., Кадров Д.Н. Комплексный контроль состояния токоподводящих стальных штырей электролизеров Содерберга с использованием систем технического зрения // Цветные металлы. 2018. № 3. С. 27—32.
4. Zhidelev S.A. Novel Approach to Monitoring Solids of Revolution // High-Tech Vector. 2015. V. 20. № 7. P. 34—38.
5. Maksarov V.V., Olt J. Dynamic Stabilization of Machining Process Based on Local Metastability in Controlled Robotic Systems of CNC Machines // Zapiski Gornogo instituta. 2017. V. 226. P. 446—451. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.446
6. Shirmohammadi S., Ferrero A. Camera as the instrument: the rising trend of vision based measurement // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2014. V. 17. № 3. P. 41—47.
7. Махов В.Е., Потанов А.И., Шалдаев С.Е. Контроль геометрических параметров изделий методом светового поля // Контроль. Диагностика. 2017. № 7. С. 12—24.
8. Song Zhang. High-resolution, Real-time 3-D Shape Measurement / Abstract of the Dissertation. Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering. Stony Brook University. 2005. P. 127.

9. *Махов В.Е.* Контроль линейных размеров изделий на базе технологий фирмы «National Instruments» // Изв. ВУЗов. Приборостроение. 2010. Т. 53. № 7. С. 54—60.
10. *Abakumov I.I., Kulchitskiy A.A.* Compensation of the errors of a passive opto-electronic system for dimensional control of articles // *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2016. № 8. P. 27—30. DOI: 10.1007/s11018-016-1052-8
11. *Zhang Z.* A flexible new technique for camera calibration // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2000. V. 22. № 11. P. 1330—1334.
12. *Zhen Liu, Qun Wu, Xu Chen, Yang Yin.* High-accuracy calibration of low-cost camera using image disturbance factor // *Optics Express*. 2016. V. 24. № 21. P. 24321—24336.
13. *Kulchitskiy A.A., Fedorova E.R.* Optical inspection of solids of revolution by means of nontelecentric optics / *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 378 P. 012062. DOI:10.1088/1755-1315/378/1/012062
14. *Сарвин А.А., Кульчицкий А.А., Наумова А.К.* Оптические методы бесконтактных измерений линейных перемещений. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2011. 195 с.
15. *Фёдоров Е.М., Гольдштейн А.Е., Редько В.В.* Методы и приборы оптического бесконтактного двухкоординатного контроля диаметра и овальности электрических кабелей в процессе их производства // *Ползуновский вестник*. 2010. № 2. С. 141—149.
16. *Zav'yalov P.S., Finogenov L.V., Vlasov E.V.* A Dedicated optical system for the quality inspection of cylindrical surfaces // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016. V. 52, № 7. P. 415—420.
17. *Potapov A.I., Makhov V.E.* et al. Smart-camera — Based Linear Sizing // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019. V. 55. No. 7. P. 524—532. [*Потапов А.И., Махов В.Е., Смородинский Я.Г., Маневич Е.Я.* Контроль линейных размеров на базе смарт-камеры // *Дефектоскопия*. 2019. № 7. С. 37—45.]