
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

УДК 681.142.37
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-671-679

ЦИФРОВОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР КОНТРОЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ

А. Н. Шилин*, А. А. Шилин, Р. Г. АТАМАНИЮК

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

**shanvstu@gmail.com*

Аннотация. Оболочки вращения, например обечайки, являются основными базовыми деталями аэрокосмической техники, нефтехимического и энергетического оборудования. Обечайки изготавливаются из листового материала на валковых листогибочных машинах. От технологической точности изготовления базовых деталей зависит качество выпускаемой продукции. Технологический допуск на диаметр обечайки составляет 1 %, однако существующие средства контроля не обеспечивают необходимой точности. Для контроля размеров обечайки в процессе ее изготовления разработан оптико-электронный измерительный прибор, содержащий микроконтроллер, измерительные преобразователи углового положения кромки детали относительно оптической оси, ее температуры и расстояния от прибора до детали. В качестве преобразователя положения кромки детали используется цифровая камера, температура измеряется с помощью пирометра. Оптико-электронный прибор в процессе изготовления детали измеряет отклонения диаметра от номинального размера и температуры детали, а затем с помощью микроконтроллера приводит результат измерения к нормальным температурным условиям.

Ключевые слова: контроль крупногабаритных деталей, оптико-электронные приборы, пирометры, микроконтроллеры, дальномеры

Ссылка для цитирования: Шилин А. Н., Шилин А. А., Атаманюк Р. Г. Цифровой оптико-электронный измерительный прибор контроля крупногабаритных оболочек вращения // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 8. С. 671—679. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-671-679.

DIGITAL OPTOELECTRONIC MEASURING DEVICE FOR MONITORING LARGE-SIZED SHELLS OF REVOLUTION

A. N. Shilin*, A. A. Shilin, R. G. Atamaniuk

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

**shanvstu@gmail.com*

Abstract. Shells of revolution, such as barrels, are the main basic parts of aerospace, petrochemical, and power equipment. The shells are made from sheet material on roller bending machines. The quality of products depends on the technological accuracy of manufacturing basic parts. The technological tolerance for the shell diameter is 1%, however, the existing control tools do not provide the required accuracy. An optoelectronic measuring device is developed to control the shell dimensions during its manufacture; the device contains a microcontroller and measuring transducers of the angular position of the workpiece edge relative to the optical axis, the part temperature and its distance from the device. A digital camera is used as a workpiece edge position transducer, and the temperature is measured using a pyrometer. In the process of the part manufacturing, the optical-electronic device measures the deviation of the diameter from the nominal size and temperature of the part, and then, with the help of a microcontroller, brings the measurement result to normal temperature conditions.

Keywords: control of large parts, optoelectronic devices, pyrometers, microcontrollers, rangefinders

For citation: Shilin A. N., Shilin A. A., Atamaniuk R. G. Digital optoelectronic measuring device for monitoring large-sized shells of revolution. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 8. P. 671—679 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-671-679.

Введение. Основной базовой деталью аэрокосмической техники, нефтехимического и энергетического оборудования является крупногабаритная оболочка вращения — обечайка, изготавливаемая на листогибном оборудовании из листового материала методом гибки. Технологическая точность производства обечаек существенно влияет на качество и эксплуатационные характеристики готовой продукции. Основной операцией технологического процесса является правка заготовки, а именно придание ей правильной цилиндрической формы. Исправление формы в поперечном сечении обечайки (правка) осуществляется при ее вращении в валках листогибной машины за счет локального изгибающего усилия, которое создается с помощью перемещающихся валков.

В настоящее время на заводах, выпускающих крупногабаритные оболочечные конструкции, в основном используются ручные контактные средства контроля размеров и формы обечаек. Технологический допуск на диаметр обечайки составляет 1 %, и существующие средства контроля не обеспечивают необходимой точности. Необходимо отметить, что используемое на большинстве предприятий листогибное оборудование не оснащено современными системами контроля формы поперечного сечения обечаек. Кроме того, перед технологическим процессом формообразования для уменьшения усилий обечайки предварительно нагреваются до 1000 °С. Время формообразования детали ограничено — допустимо снижение температуры только до 600 °С, что предъявляет требования к оперативности контроля. Таким образом, разработка и внедрение современных средств контроля геометрических параметров обечаек в процессе их формообразования является весьма актуальной задачей для отечественного машиностроения.

Анализ показал, что целесообразно использовать оптические и оптико-электронные приборы и системы для контроля геометрических параметров крупногабаритных оболочек вращения. Таким образом, целью настоящей статьи является разработка оптико-электронного измерительного прибора, содержащего микроконтроллер и дополнительные измерительные преобразователи — пирометр и дальномер, а также устройство автоматического базирования, позволяющие повысить точность и оперативность контроля размеров обечаек в процессе их изготовления.

Разработаны оптические приборы для измерения диаметра крупногабаритных деталей [1, 2], реализующие угловой бесцентровый метод измерения, который технически более прост, чем методы, предполагающие автоматический поиск базовой оси детали. Приборы, предложенные в [1, 2], содержат угловые блоки задания размеров, на которых закреплены оптические преобразователи углового положения кромки детали. Отличительными особенностями этих приборов являются блоки задания размера с линейной шкалой задающего устройства. Прибор [1] содержит оптико-механический блок задания размера с трехмерной кинематической схемой, состоящий из установленного с возможностью осевого перемещения конуса, рычага и пружины, обеспечивающей контакт свободного конца рычага с поверхностью конуса. Прибор [2] содержит оптико-механический блок задания размера, представляющий собой сложную плоскую многозвенную кинематическую схему. Общим недостатком этих приборов является сложность конструкции, технологическая точность изготовления элементов которых отрицательно влияет на точность задания размера и соответственно точность измерения. Кроме того, оператор визуально определяет результат измерения, а регистрируемый размер нагретой детали не приводится к нормальной температуре. Уровень температур-

ной деформации при остывании детали может превышать допуск на ее размер, что является источником погрешности измерения устройства.

В настоящее время проблемы линеаризации характеристик измерительных приборов решаются с помощью микроконтроллеров, которые являются основным блоком интеллектуальных измерительных приборов [3, 4]. Кроме того, микроконтроллеры позволяют решать задачи повышения метрологических характеристик, диагностики, обработки результатов измерения и др. Таким образом, использование микроконтроллера позволяет преодолеть недостатки приборов [1, 2]. Для установки микроконтроллера необходимы математическая модель процесса измерения и алгоритм работы.

Первым этапом проектирования оптико-электронных приборов и систем измерения является выбор оптической схемы измерения по условию минимальной методической погрешности. По оптической схеме измерения задается уравнение, связывающее угловое смещение касательной оптического луча измерительного преобразователя с отклонением размера от номинального. Так, например, отклонение текущего радиуса ΔR поперечного сечения цилиндрической детали номинального размера R соответствует угловому смещению касательной к поперечному сечению обечайки:

$$\Delta\psi = f(\Delta R, R, x_1, y_1, z_1),$$

где x_1, y_1, z_1 — координаты измерительного преобразователя.

Моделирование геометрических преобразований в оптических схемах. Методы моделирования геометрических преобразований основаны на использовании основ тригонометрии, аналитической геометрии и векторного исчисления. Необходимо отметить, что для компьютерного моделирования оптических систем оптико-электронных приборов необходима формализация всех операций геометрических преобразований.

Использование аппарата аналитической геометрии позволяет формализовать основные операции, однако этому методу присущ недостаток: при моделировании оптических схем возникают трудности определения знака перед радикалом формулы, с помощью которой определяется расстояние между двумя точками на координатной плоскости, поскольку задается направление прямой, а не луча. Если при моделировании геометрических преобразований используется вся координатная плоскость, то для каждого координатного угла составляется свое уравнение, и в этом случае требуются четыре уравнения. Причем предварительный анализ для определения знаков в уравнениях — операция более трудоемкая и менее формализуемая, чем составление самих уравнений [5]. Таким образом, основной проблемой моделирования геометрических преобразований является выбор математического аппарата, позволяющего формализовать все геометрические операции с помощью одного уравнения. В то же время в электротехнике широко используется символический метод расчета электрических цепей переменного тока [6, 7], который позволяет геометрические операции над векторами заменить алгебраическими. Этот метод основан на изображении векторов на комплексной плоскости и введении операций над ними.

Необходимо отметить, что для решения уравнений в комплексной форме разработаны компьютерные программы. Предварительный анализ потенциальных возможностей математического аппарата теории функции комплексного переменного (ТФКП) позволил сделать вывод, что основные геометрические преобразования в оптических системах могут быть сравнительно просто приведены с помощью аппарата ТФКП к алгебраическим операциям [8]. Если возникает пространственная задача, то по возможности следует ее свести к плоскостным.

Алгебраизация основных геометрических операций. Основные геометрические операции, которые используются в оптических системах, могут быть представлены аналитически на комплексной плоскости:

1) поворот отрезка прямой (луча) $\mathbf{A} = Ae^{j\alpha}$ на угол $\pm \phi$ может быть аналитически выражен следующим образом:

$$\mathbf{A}_1 = Ae^{\pm j\alpha} e^{\pm j\phi} = Ae^{j(\alpha \pm \phi)}, \quad (1)$$

где $e^{\pm j\phi}$ — оператор поворота;

2) операция увеличения длины отрезка (луча) A в d раз:

$$\mathbf{A}_1 = d \cdot Ae^{j\alpha};$$

3) операция сложения двух отрезков (лучей) $\mathbf{A} = a_1 + ja_2$ и $\mathbf{B} = b_1 + jb_2$:

$$\mathbf{A} \pm \mathbf{B} = (a_1 \pm b_1) + j(a_2 \pm b_2);$$

4) положение касательной к контуру, выраженному с помощью параметрического уравнения $\mathbf{w}(t) = u(t) + jv(t)$, определяется производной

$$\mathbf{w}'(t) = u'(t) + jv'(t)$$

и если производная $\mathbf{w}'(t)$ существует в точке t_0 , то вектор на комплексной плоскости $\mathbf{w}'(t_0)$ направлен по касательной к кривой $\mathbf{w}(t)$;

5) положение отраженного луча может быть выражено через касательную к контуру, поскольку угол отражения определяется по углу падения относительно нормали:

$$\arg(\mathbf{n}) = \arg(\boldsymbol{\tau}) + \pi/2,$$

где $\boldsymbol{\tau}$ — единичный вектор, касательный к контуру; $\mathbf{n}$ — единичный вектор нормали контура.

Таким образом, практически все геометрические преобразования могут быть выражены алгебраически.

Рассмотрим пример получения уравнения измерения с использованием оптической схемы на комплексной плоскости. Представим на комплексной плоскости (рис. 1) координаты точки касания оптического луча F измерительного преобразователя последовательно через координаты базового валка A , координаты установки направляющих B , координаты положения измерительного преобразователя C в направляющих. Для этого составим в общем виде уравнение для векторов, определяющих схему измерения:

$$\mathbf{R} + \mathbf{L} + \mathbf{H} + \mathbf{K} + \mathbf{R}_1 = 0. \quad (2)$$

Затем в уравнении (2) представим комплексные величины в показательной форме, поскольку поворот отрезков осуществляется с помощью оператора поворота (1):

$$R \cdot e^{-j\pi/2} + L \cdot e^{-j\pi/2 + j\pi/2} + H \cdot e^{j\pi/2} + K \cdot e^{j\pi/2 + \phi} + R \cdot e^{j\pi + \phi} = 0. \quad (3)$$

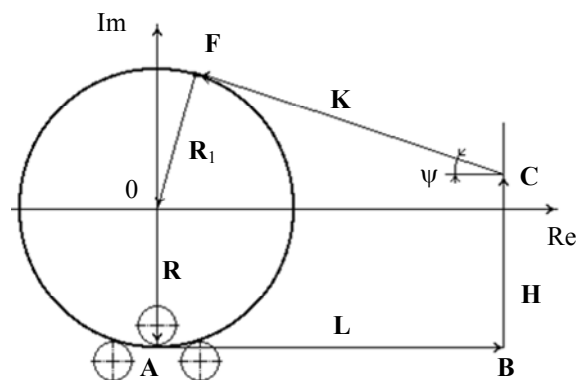


Рис. 1

С помощью формул Эйлера перейдем к тригонометрической форме записи уравнения

$$K \cos \phi - R \sin \phi + j(R \cos \phi + K \sin \phi) = R - H + jL. \quad (4)$$

Выражение в комплексной форме (4) можно представить в виде системы двух уравнений с действительными величинами

$$K \cos \varphi - R \sin \varphi = R - H;$$

$$R \cos \varphi + K \sin \varphi = L.$$

Введя новую переменную $\psi = \pi/2 - \varphi$, которая определяет положение оптического луча измерительного преобразователя, касательного к контуру детали, относительно горизонтали, и решив систему относительно неизвестной величины, определим искомую величину R :

$$R = \frac{L \sin \psi + H \cos \psi}{1 + \cos \psi}.$$

Выражение полностью совпадает с уравнением (1), полученным для этой задачи другим, более громоздким, методом. Из уравнения (3) выразим зависимость ψ от R , которая необходима для градуировки устройства установки измерительного преобразователя

$$e^{j(\pi/2 - \psi)} = \frac{-H + R + jL}{K + jR}. \quad (5)$$

Левую часть уравнения (5) преобразуем в тригонометрическую форму, а в правой части освободимся от комплексной величины в знаменателе, умножив числитель и знаменатель этого уравнения на выражение, сопряженное знаменателю:

$$\sin \psi + j \cos \psi = \frac{K(R - H) + LR}{K^2 + R^2} + j \frac{LK - R(R - H)}{K^2 + R^2}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) получим искомую зависимость:

$$\psi = \arcsin. \quad (7)$$

Выражение (7) также совпадает с выражением, полученным с помощью другого метода [5].

Оптико-электронный измерительный преобразователь позволяет измерять наружный размер обечайки при температуре ее формообразования. Однако в результате измерения должен быть определен внутренний размер, приведенный к нормальной температуре. Поэтому при учете толщины листового материала и температурной деформации уравнение измерения примет следующий вид:

$$R = \frac{L \sin \psi + H \cos \psi}{(1 + \cos \psi)(1 + \alpha \Delta \Theta)} - h, \quad (8)$$

где h — толщина листового материала; α — коэффициент линейного расширения материала детали; $\Delta \Theta$ — разность температур обечайки и окружающей среды.

Механическая конструкция оптико-электронного измерительного прибора для контроля размеров и формы поперечного сечения обечайки 1 в процессе ее формообразования с помощью валков 2 листогибочной машины изображена на рис. 2.

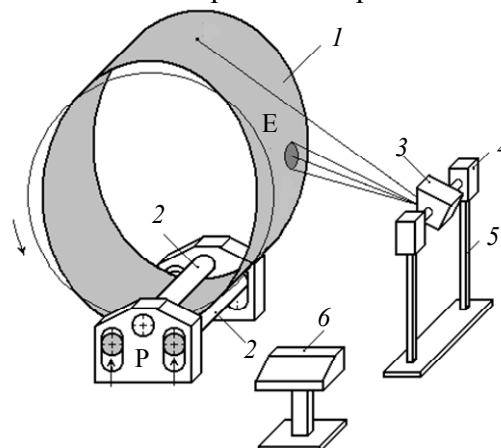


Рис. 2

Формообразование обечайки осуществляется в процессе ее вращения в валках и перемещения на заданный радиус кривизны двух нижних валков с усилием P . Оптико-

электронный прибор содержит блок из трех измерительных преобразователей, расположенных в корпусе 3, который установлен в вертикальной плоскости. С помощью сервопривода с шаговым двигателем 4, закрепленного на стойках 5, прибор может поворачиваться. Органы управления, устройства отображения информации и электрические схемы расположены в пульте управления 6 (рис. 3). Преобразователь положения кромки детали $\Delta\Psi$ относительно оптической оси объектива ИП₁ представляет собой цифровую камеру. Прибор содержит также пирометр ИП₂ для измерения температуры детали Θ в зоне точки E и лазерный дальномер ИП₃, определяющий расстояние S от пирометра до детали, необходимое для коррекции погрешности пирометра. Для повышения точности измерения температуры местоположение точки E на поверхности детали выбирается таким образом, чтобы нормаль в этой точке максимально совпадала с направлением потока излучения к пирометру. Выходы преобразователей ИП₁—ИП₃ подключены через коммутатор K_1 ко входу микроконтроллера МК, а к выходу подключены через коммутатор K_2 устройства отображения информации: отклонение диаметра детали от номинального ΔD — ОИ₁, температуры детали Θ — ОИ₂ и исполнительный механизм ИМ — сервопривод, для установки цифровой камеры на угол Ψ , соответствующий номинальному размеру детали. Кроме того, на вход МК подаются исходные данные для расчетов: номинальный диаметр детали D_n , толщина листового материала h , коэффициент линейного температурного расширения материала детали α и коэффициент излучательной способности поверхности материала ε .

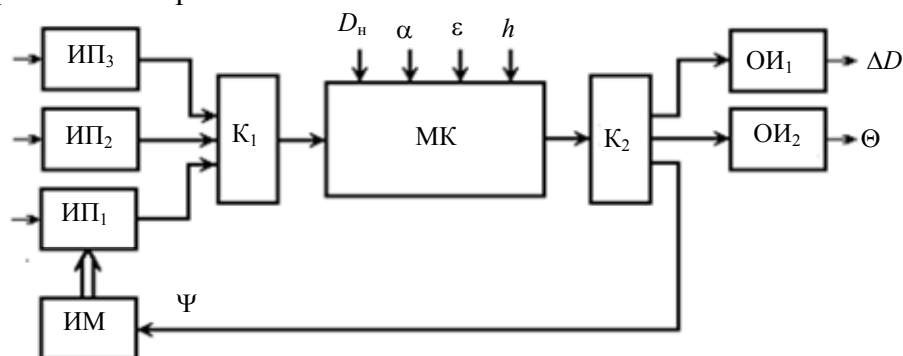


Рис. 3

Прибор работает следующим образом. Перед измерением блок измерительных преобразователей 3 (ИП₃) с помощью сервопривода 4 устанавливается в угловое положение, соответствующее номинальному размеру обечайки. Вычисление угла осуществляется микроконтроллером по исходным данным и выражению (7). Во время технологического процесса формообразования предварительно нагретая до 1000 °С обечайка вращается в валках листогибочной машины. Цифровая камера ИП₁ регистрирует угловое отклонение проекции границы детали от оптической оси камеры. Пирометр ИП₂ регистрирует температуру детали, необходимую для введения температурной поправки на размер детали при ее остывании и для определения момента окончания технологического процесса формообразования, так как при 600 °С технологический процесс должен быть прекращен из-за начала изменения механических свойств материала детали.

Принцип действия пирометра основан на регистрации инфракрасного излучения нагретой детали. Зависимость функции спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела подчиняется закону Планка [9—11]:

$$M_{\lambda}^o(\lambda, \Theta) = c_1 \lambda^{-5},$$

где $a_1 = 2\pi h c^2 = 3,74 \cdot 10^{-12}$ Вт·см²; $b_2 = hc/k = 1,438 \cdot 10^4$ мкм·К; $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж/с — постоянная Планка; $c = 2,98 \cdot 10^{10}$ см/с — скорость света в вакууме; $k = 1,3805 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана.

Функция $M_{\lambda}^o(\lambda, \Theta)$ достигает максимального значения при длине волны λ_M , которая связана с температурой излучающей поверхности выражением закона смещения Вина:

$$\lambda_M \Theta = B = 2896 \text{ мкм} \cdot \text{К}.$$

Из закона Вина и уравнения Планка определяется максимальное значение функции

$$M_{\lambda_M}^o(\lambda_M, \Theta) = 1,315(10^{-3} \Theta)^5.$$

Максимальным значениям функций для заданных выше значений температуры $\Theta_1 = 873$ и $\Theta_2 = 1273$ К соответствуют длины волн: $\lambda_{1m} = 2896/\Theta_1 = 3,32$ и $\lambda_{2m} = 2896/\Theta_2 = 2,28$ мкм.

Практически весь спектр излучения нагретого изделия при некоторой температуре практически находится в диапазоне от $0,5\lambda_{2m}$ до $3\lambda_{1m}$. На основании этого определяется спектральный диапазон пирометра $\lambda_{\min} = 0,5\lambda_{2m} = 1,14$ мкм; $\lambda_{\max} = 3\lambda_{1m} = 9,96$ мкм.

Все соотношения, представленные выше, справедливы для абсолютно черных тел. Закон Планка для реального излучателя задается следующим выражением:

$$M_{\lambda}(\lambda, \Theta) = \varepsilon(\lambda, \Theta) M_{\lambda}^o(\lambda, \Theta).$$

Коэффициент излучения $\varepsilon(\lambda, \Theta)$ зависит от материала, температуры, длины волны, состояния излучающей поверхности и степени ее окисления [8—10]. Однако у деталей с шероховатыми поверхностями коэффициент излучения не зависит от длины волны [12]. Такие излучающие тела являются серыми, их коэффициент излучения является практически постоянным. Необходимо отметить, что листовый материал, из которого изготавливаются обечайки, имеет шероховатую поверхность.

Энергетическая сила света абсолютно черного тела в заданном направлении, характеризуемом углом φ от нормали к поверхности излучения, определяется законом Ламберта:

$$dI(\varphi) = L_e \cdot dS \cdot \cos \varphi,$$

где L_e — энергетическая яркость, которая в рассматриваемом случае не зависит от угла φ ; dS — площадь излучающей поверхности.

Излучение реальных тел подчиняется закону Ламберта только в ограниченном диапазоне угла φ , причем для шероховатых поверхностей закон Ламберта выполняется с меньшей погрешностью [9]. Поэтому пирометр закрепляется в корпусе блока с угловым смещением относительно цифровой камеры, регистрирующей положение касательной к поверхности обечайки. Измеренное значение температуры поверхности в точке E имеет меньшую погрешность, чем на краевом участке цилиндрической поверхности в точке F с большим значением угла φ .

Для определения величины температурной деформации при остывании детали необходима информация о коэффициенте линейного теплового расширения. Истинная величина ко-

эффициента определяется выражением $\alpha_i = \frac{\delta l}{\delta \Theta} \cdot \frac{1}{l_i}$.

При работе в одинаковых диапазонах температур для всех образцов удобно использовать средний (интегральный) коэффициент в интервале значений температуры $\Delta\Theta^*$:

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\Delta l}{l \Delta \Theta}.$$

Средние значения температурного коэффициента линейного расширения для различных материалов приводятся в справочниках по материаловедению, также возможно найти коэффициент из выражения [13, 14]:

* ГОСТ Р 8.940 - 2017. Медно-цинковые сплавы. Дата введения 2018-03-01.

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{N}{V^{2/3} M_{\text{мол}}} \cdot \frac{1}{(\theta_D^2)},$$

где $M_{\text{мол}}$ — молекулярная масса; θ_D — температура Дебая; N — постоянная величина, для металлов $7,24 \cdot 10^{-2}$; V — объем металла.

Существуют и другие, более точные, выражения для определения коэффициента, однако использовать их в этой задаче нецелесообразно, поскольку погрешность задания коэффициента входит косвенно в погрешность измерения размера. Поэтому величина температурной деформации и, следовательно, отклонение диаметра детали определяется выражением:

$$\Delta D = \alpha_{\text{ср}} D_{\text{н}} \Delta \Theta.$$

Дальномер ИП₃ определяет расстояние S между пирометром и деталью, информация о котором необходима для введения поправки на результат измерения температуры пирометром, поскольку его погрешность измерения зависит от расстояния. Погрешность лазерного дальномера, которая имеет аддитивный характер, составляет 1 мм. Необходимо отметить: погрешность дальномера входит косвенно в погрешность измерения размера.

По результатам измерения микроконтроллер вычисляет внутренний размер детали, приведенный к нормальным температурным условиям с помощью выражения (8). Результат измерения диаметра поперечного сечения и температуры детали отображается на устройствах ОИ₁ и ОИ₂.

Выводы. Таким образом, введение в оптико-электронный прибор основного интеллектуального блока (микроконтроллера), дополнительных измерительных преобразователей (пирометра и дальномера) и устройства автоматического базирования позволяет повысить точность и оперативность контроля, а также удобство работы. Результатом работы прибора является измеренный размер диаметра нагретой обечайки, приведенный к нормальным температурным условиям. Кроме того, повышение оперативности контроля позволяет исключить дополнительную повторную технологическую операцию формообразования детали, которая возникает, если за время остывания детали до 600 °С технологический процесс не успевает завершиться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2181190 РФ, МПК G01B 21/10. Оптическое устройство для измерения диаметров крупногабаритных деталей / А. Н. Шилин, С. А. Бедкин, Е. Г. Зенина. Заявл. 09.06.2000; опубл. 10.04.2002.
2. Пат. 171730 РФ, МПК G01B 11/08. Оптическое устройство для измерения диаметров крупногабаритных деталей / Д. Г. Сницарук, А. Н. Шилин. Заявл. 29.12.2016; опубл. 13.06.2017.
3. Джексон Р. Г. Новейшие датчики. М.: Техносфера, 2007. 384 с.
4. Войтович И. Д., Корсунский В. М. Интеллектуальные сенсоры. М.: Интернет-Университет Информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 624 с.
5. Шилин А. Н. Исследование методических погрешностей оптико-электронных информационно-измерительных систем управления производством обечаек // Измерительная техника. 1989. № 10. С. 8—10.
6. Бессонов А. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. М.: Высшая школа, 1978. 528 с.
7. Нейман В. Ю. Теоретические основы электротехники в примерах и задачах. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. 166 с.
8. Шилин А. Н. Моделирование геометрических преобразований при оптических измерениях профиля деталей // Изв. вузов. Приборостроение. 1999. Т. 42, № 5-6. С. 44—47.
9. Афанасьев А. В., Орлов И. Я. Инфракрасный микропроцессорный пирометр с диафрагмальной оптикой // Приборы и техника эксперимента. 2003. № 1. С. 149—152.
10. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с франц. М.: Мир, 1998. 416 с.

11. Магунов А. Н. Спектральная пирометрия. М.: Физматлит, 2012. 248 с.
12. Топорец А. С. Оптика шероховатой поверхности. Л.: Машиностроение, 1988. 191 с.
13. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: Справ. изд-е. М.: Металлургия, 1989. 384 с.
14. Лившиц Б. Г., Крапошин В. С., Липецкий Я. Л. Физические свойства металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1980. 320 с.

Сведения об авторах

- Александр Николаевич Шилин** — д-р техн. наук, профессор; Волгоградский государственный технический университет, кафедра электротехники; E-mail: shanvstu@gmail.com
- Алексей Александрович Шилин** — канд. техн. наук, доцент; Волгоградский государственный технический университет, кафедра электротехники; заведующий кафедрой; E-mail: shilin.jr@gmail.com
- Рамез Ганиевич Атаманюк** — аспирант; Волгоградский государственный технический университет, кафедра электротехники; E-mail: atamanuk@gmail.com

Поступила в редакцию 05.12.2022; одобрена после рецензирования 28.03.2023; принята к публикации 22.06.2023.

REFERENCES

1. Patent RU 2181190, G01B 21/10, *Opticheskoye ustroystvo dlya izmereniya diametrov krupnogabaritnykh detaley* (Optical Device to Measure Diameters of Large-Sized Parts), A.N. Shilin, S.A. Bedkin, E.G. Zenina, Priority 2000.06.09, Published 2002.04.10. (in Russ.)
2. Patent RU 171730, G01B 11/08, *Opticheskoye ustroystvo dlya izmereniya diametrov krupnogabaritnykh detaley* (Optical Device for Measuring the Diameters of Large Parts), D.G. Snitsaruk, A.N. Shilin, Patent application no., Priority 2016.12.29, Published 2017.06.13. (in Russ.)
3. Jackson R.G. *Novel Sensors and Sensing*, Boca Raton, CRC Press, 2004, 512 p.
4. Voytovich I.D., Korsunskiy V.M. *Intellectual'nyye sensory* (Smart Sensors), Moscow, 2012, 624 p. (in Russ.)
5. Shilin A.N. *Measurement Techniques*, 1989, no. 10, pp. 8–10. (in Russ.)
6. Bessonov A.A. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki: Elektricheskiye tsepi* (Theoretical Foundations of Electrical Engineering: Electrical Circuits), Moscow, 1978, 528 p. (in Russ.)
7. Neiman V.Yu. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki v primerakh i zadachakh* (Theoretical Foundations of Electrical Engineering in Examples and Tasks), Novosibirsk, 2015, 166 p. (in Russ.)
8. Shilin A.N. *Journal of Instrument Engineering*, 1999, no. 5-6(42), pp. 44–47. (in Russ.)
9. Afanas'ev A.V., Orlov I.Ya. *Instruments and Experimental Techniques*, 2003, no. 1(46), pp. 135–138.
10. Gaussorgues G. *La Thermographie Infrarouge. Principes, technologies, applications*, Lavoisier, 1984.
11. Magunov A.N. *Spektral'naya pirometriya* (Spectral Pyrometry), Moscow, 2012, 248 p. (in Russ.)
12. Toporets A.S. *Optika sherokhovatoy poverkhnosti* (Optics of a Rough Surface), Leningrad, 1988, 191 p. (in Russ.)
13. Zinoviev V.E. *Teplofizicheskiye svoystva metallov pri vysokikh temperaturakh* (Thermophysical Properties of Metals at High Temperatures), Moscow, 1989, 384 p. (in Russ.)
14. Livshits B.G., Kraposhin V.S., Lipetsky Ya.L. *Fizicheskiye svoystva metallov i splavov* (Physical Properties of Metals and Alloys), Moscow, 1980, 320 p. (in Russ.)

Data on authors

- Alexander N. Shilin** — Dr. Sci., Professor; Volgograd State Technical University, Department of Electrical Engineering; E-mail: shanvstu@gmail.com
- Alexey A. Shilin** — PhD, Associate Professor; Volgograd State Technical University, Department of Electrical Engineering; Head of the Department; E-mail: shilin.jr@gmail.com
- Ramez G. Atamaniuk** — Post-Graduate Student; Volgograd State Technical University, Department of Electrical Engineering; E-mail: atamanuk@gmail.com

Received 05.12.2022; approved after reviewing 28.03.2023; accepted for publication 22.06.2023.