

**БЕСЦЕНТРОВАЯ СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯМИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБОЛОЧЕК
В ПРОЦЕССЕ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ****А. Н. Шилин*, А. А. Шилин, Р. Г. Атаманюк***Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия*** shanvstu@gmail.com*

Аннотация. Проанализирована оптическая система контроля отклонений поверхности крупногабаритных оболочек (а именно обечаек) от цилиндрической формы в процессе их формообразования на валковых листогибочных машинах. Требуемая форма детали обеспечивается правильным подбором технологического процесса на такой машине. Точность размеров обечайки достигается при соответствующей точности разметки и раскроя заготовки. Разработан оптико-электронный измерительный прибор, регистрирующий положение касательного луча к поперечному сечению обечайки, предназначенный для контроля размеров обечайки в процессе ее изготовления. Этот прибор имеет сравнительно простую оптическую схему измерения. Основной проблемой контроля формы поперечного сечения обечайки с помощью этого прибора является непостоянство положения центра сечения при вращении обечайки в валках машины. С целью преодоления этой проблемы сформирована математическая модель процесса измерения для такого прибора, а также выполнен анализ погрешностей.

Ключевые слова: контроль крупногабаритных деталей, оптические схемы измерения, оптические и оптико-электронные приборы, бесцентровые методы контроля цилиндрических деталей

Ссылка для цитирования: Шилин А. Н., Шилин А. А., Атаманюк Р. Г. Бесцентровая схема управления профилями крупногабаритных оболочек в процессе их формирования // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 10. С. 887–892. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-887-892.

CENTERLESS CONTROL SCHEME FOR LARGE-SIZED SHELL PROFILES DURING THEIR FORMATION**A. N. Shilin*, A. A. Shilin, R. G. Atamanyuk***Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia*** shanvstu@gmail.com*

Abstract. An optical system for monitoring the deviations of the surface of large-sized shells from the cylindrical shape during their shaping on roll sheet bending machines is analyzed. The required shape of the part is ensured by the correct selection of the technological process on such a machine. The accuracy of the shell dimensions is achieved with the appropriate accuracy of marking and cutting the workpiece. An optical-electronic measuring device is developed that records the position of the tangent beam to the cross-section of the shell, designed to control the shell dimensions during its manufacture. This device has a relatively simple optical measurement scheme. The main problem of monitoring the cross-sectional shape of the shell using this device is the inconstancy of the position of the center of the section when the shell rotates in the machine rolls. In order to overcome this problem, a mathematical model of the measurement process for such a device is created, and an error analysis is performed.

Keywords: control of large-sized parts, optical measurement schemes, optical and optoelectronic devices, centerless methods of control of cylindrical parts

For citation: Shilin A. N., Shilin A. A., Atamanyuk R. G. Centerless control scheme for large-sized shell profiles during their formation. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 10. P. 887–892 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-887-892.

Введение. Обечайка представляет собой основной элемент конструкций, используемых, например, в аэрокосмической, нефтехимической и энергетической отраслях. Она производится из листового материала на специализированном оборудовании для гибки металла. Точность среднего диаметра обечайки определяется точностью разметки и раскроя листовой заготовки. Технологическая точность формирования цилиндрической поверхности обечайки на листогибочной машине напрямую влияет на эффективность сборочных и монтажных операций, а также

на эксплуатационные характеристики конечного изделия. Критически важным этапом в этом технологическом процессе является формирование цилиндрической формы заготовки при ее вращении в валках листогибочной машины.

Для контроля размеров деталей были разработаны измерительные приборы на основе углового бесцентрового метода измерения [1, 2]. Эти приборы позволяют отслеживать размеры деталей с использованием простой (по сравнению с методами, включающими автоматический поиск базовой оси детали) в технической реализации методики. При этом основную сложность при контроле формы поперечного сечения обечайки с помощью этих приборов представляет непостоянство положения центра сечения при вращении обечайки в валках машины. К преимуществам углового бесцентрового метода контроля размеров и формы поперечного сечения обечайки относятся сравнительно простая техническая реализация и возможность контроля формы продольного сечения обечайки (конусности, бочкообразности и вогнутости) за счет перемещения преобразователя по длине детали. Недостаток этого метода — погрешность регистрации формы поперечного сечения. Поэтому для бесцентровой схемы управления технологическим процессом необходимо сформировать математическую модель процесса измерения и выполнить анализ погрешностей.

На начальном этапе проектирования оптико-электронных приборов по условию минимальной методической погрешности выбирается оптическая схема измерения. Затем по этой схеме определяется выражение, связывающее координату точки контроля поверхности с угловым смещением касательной.

Разработанный прибор функционирует следующим образом (рис. 1; 1 — обечайка, 2 — валки, 3 — блок измерительных преобразователей, 4 — сервопривод, 5 — стойки, 6 — пульт управления). Перед измерением блок преобразователей, состоящий из цифровой камеры и пирометра, с помощью сервопривода устанавливается в угловое положение, соответствующее номинальному размеру обечайки. Камера регистрирует угловое отклонение проекции границы детали от оптической оси камеры ψ (рис. 2). Пирометр регистрирует температуру детали, необходимую для введения температурной поправки на размер детали при ее остывании и для определения момента окончания технологического процесса формообразования.

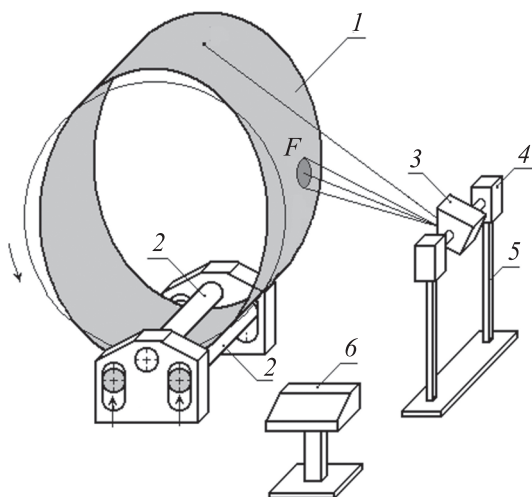


Рис. 1

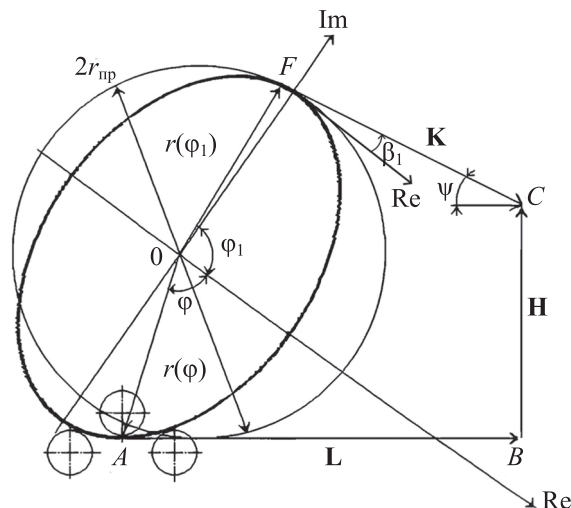


Рис. 2

Моделирование геометрических преобразований в оптических схемах. Для решения подобных задач моделирования в основном используются тригонометрический аппарат и аналитическая геометрия [3]. Их недостатком является отсутствие полной формализации всех операций, критически важной при компьютерных вычислениях. Так, при нахождении расстояния между двумя точками на координатной плоскости возникают трудности в определении знака перед радикалом формулы, поэтому, если при моделировании геометрических

преобразований используется вся координатная плоскость, для каждого квадранта составляется свое уравнение (всего требуется четыре уравнения). Причем предварительно определяются знаки в уравнениях — операция более трудоемкая и менее формализуемая, чем составление самих уравнений [4]. Для решения этих задач разработан метод, основанный на использовании комплексных чисел и их геометрическом представлении в виде векторов на комплексной плоскости. Простые алгебраические операции позволяют производить основные геометрические преобразования в оптических системах [5]. Алгебраическая формализация дает возможность использовать компьютерные программы.

Анализ бесцентровой схемы контроля профилей оболочек вращения. Информация о требуемой геометрической форме детали служит основой для выбора технологического процесса ее формирования. Однако в связи с бесцентровым характером вращения детали обеспечить регистрацию ее формы в поперечном сечении (профилограммы) затруднительно. Эта проблема описана в работах по контрольно-измерительной технике [6–8]. Однако до настоящего времени возможности использования этих методов анализа профилей были ограничены случаями преобладания гармонических компонентов профиля детали.

Определение профилограммы со сложной формой поперечного сечения — нетривиальная задача и ее решение пока не найдено. Основными причинами трудности регистрации профилограммы сложной формы являются перемещение центра обечайки при ее вращении в валах машины, неравномерность скорости вращения и то, что оптико-электронный преобразователь можно описать с помощью кинематической схемы плоского качающегося измерительного рычага. Необходимо отметить: в настоящее время технологический процесс правки обечаек осуществляется за счет установки радиусагиба с помощью перемещающего вала листогибочной машины. В этом технологическом процессе значение радиусагиба должно быть постоянным и меньше минимального радиуса кривизны контура [9].

Таким образом, необходимо исследовать возможности контроля с помощью оптико-электронной системы отклонения реальной формы обечаек от цилиндрической. Из-за особенностей технологического процесса производства обечаек в форме поперечного сечения преобладает эллипсность, или вторая гармоническая составляющая. Это обусловлено тем, что перед сваркой участку детали около сварного шва придается плоская форма, а поперечное сечение детали приобретает форму эллипса (в производстве обечаек эллипс часто называют овалом). Введем математическое определение профилограммы, что позволит выбрать подходящую схему измерения и выполнить расчет погрешности.

Для анализа бесцентрового метода измерения используем теорию функции комплексного переменного [10], с помощью которой определим функцию преобразования на комплексной плоскости реального профиля детали в профилограмму (рис. 2).

Для решения этой задачи введем ограничение и допущение, а именно аппроксимируем реальную форму поперечного сечения обечайки формой одной второй гармонической составляющей. Поэтому профиль детали представим в виде комплексного радиуса-вектора:

$$r(\varphi) = r_0 + r_m \sin(2\varphi), \quad (1)$$

где r_0 — средний радиус профиля детали; r_m — амплитуда гармонической составляющей профиля детали.

Определим угол наклона касательной в точке А:

$$\beta = \arctg \left(\frac{(6\cos^2\varphi - 2)\sin\varphi r_m + \cos\varphi r_0}{(6\cos^3\varphi - 4\cos\varphi)r_m - \sin\varphi r_0} \right). \quad (2)$$

Аналогично выразим угол β_1 — наклон касательной в точке F через производную к контуру с неизвестной координатой φ_1 , затем выразим координату точки С относительно двух переменных

$$C = r(\varphi)e^{i\varphi} + Le^{i\beta} + He^{j\left(\beta + \frac{\pi}{2}\right)}, \quad (3)$$

$$C = r(\varphi_1)e^{j\varphi_1} + Le^{j\beta_1}, \quad (4)$$

где H — высота установки измерительного преобразователя; L — расстояние от центрального вала до места установки измерительного преобразователя; K — расстояние от измерительного преобразователя до точки касания оптического луча с поверхностью контролируемой детали.

Для определения координаты точки касания φ_1 оптической оси оптико-электронного измерительного преобразователя к контуру детали составим равенство из правых частей уравнений:

$$e^{j\varphi}r(\varphi) + Le^{j\beta} + He^{j(\beta + \frac{\pi}{2})} = r(\varphi_1)e^{j\varphi_1} + Ke^{j\beta_1}. \quad (5)$$

Измерительный преобразователь прибора регистрирует угол ψ , показывающий наклон этого преобразователя относительно горизонта. С помощью данного угла возможно определить положение точки контролируемой поверхности. Для вычисления угла ψ необходимо из уравнения (5) предварительно найти угол β_1 . Аналитически решить это уравнение сложно, поэтому оно решалось численно: в некотором диапазоне задавались значения угла β_1 и определялось то, при котором выполняется равенство (5). Затем вычислялись значения угла $\psi = \beta + \pi - \beta_1$, а далее находился приведенный радиус детали $r_{пр}$ с помощью следующей формулы [11]:

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

Поскольку с помощью этой схемы невозможно измерить текущий радиус профиллограммы, для контроля величины овальности $2r_m$ используется приведенный радиус детали, т. е. радиус цилиндрической детали, который соответствует координате точки касания оптической оси преобразователя.

На рис. 3 приведены развернутые профиллограммы, полученные при моделировании деталей с различными значениями овальности и высоты установки измерительного преобразователя H (пунктир — профиллограмма реальной детали для точки А, сплошная кривая — профиллограмма, зарегистрированная с помощью измерительной системы; а — $r_m/r_0 = 0,1$, $H = 0,5r_m$; б — $r_m/r_0 = 0,1$, $H = 2r_m$; в — $r_m/r_0 = 0,2$, $H = 0,5r_m$; г — $r_m/r_0 = 0,2$, $H = 2r_m$).

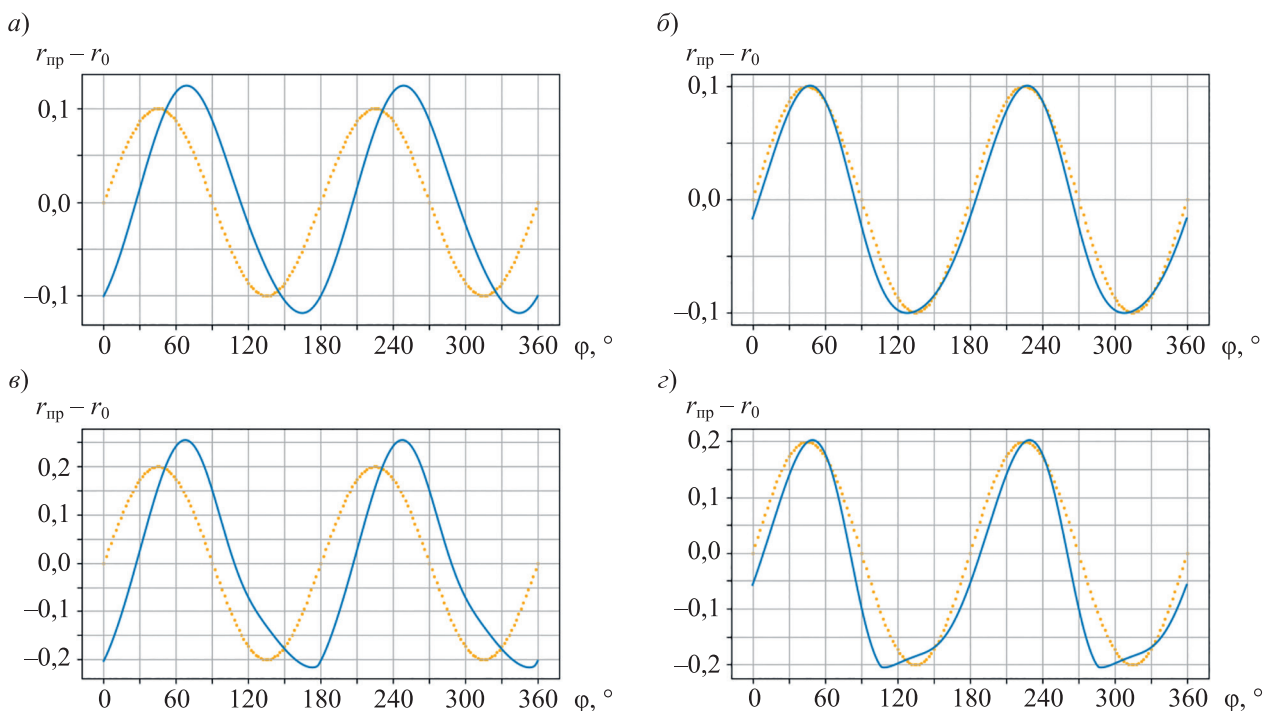


Рис. 3

Ошибка измерения эллиптичности определяется следующим образом:

$$\varepsilon = (r_{\text{пр}} - r_0)_{\text{max}} - (r_{\text{пр}} - r_0)_{\text{min}}.$$

Установлено, что эта ошибка достигает минимального значения при $H = 2r_0$.

Выводы. Выполненное моделирование бесцентровой схемы контроля профилей крупногабаритных оболочек в процессе их формообразования показало, что при определенных параметрах схемы измерения (а именно при $H = 2r_0$) возможно с минимальной погрешностью контролировать овальность и минимальный радиус кривизны контура детали. Полученные результаты контроля могут быть использованы для управления технологическим процессом формирования, а именно задания радиуса гибки по контуру.

Результаты разработки и исследования внедряются на промышленном предприятии „Волгограднефтемаш“.

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. Рывкин А. А., Рывкин А. З., Хренов Л. С. Справочник по математике. М.: Высш. шк., 1987. 480 с.
4. Шилин А. Н. Исследование методических погрешностей оптико-электронных информационно-измерительных систем управления производством обечаек // Измерительная техника. 1989. № 10. С. 8–10.
5. Шилин А. Н. Моделирование геометрических преобразований при оптических измерениях профиля деталей // Изв. вузов. Приборостроение. 1999. Т. 42, № 5-6. С. 44–47.
6. Гебель И. Д. Бесцентровое измерение формы профиля тел вращения // Измерительная техника. 1973. № 3. С. 24–27.
7. Гебель И. Д. Инвариантные свойства отклонения профиля от круглой формы // Измерительная техника. 1978. № 11. С. 16–19.
8. Сергеев С. А., Горохов Л. Я. Общая схема измерения некруглости с виртуальным базированием // Изв. вузов. Приборостроение. 1999. № 5-6. С. 32–37.
9. Берлинер Ю. И., Балашов Ю. А. Технология химического и нефтяного аппаратостроения. М.: Машиностроение, 1976. 256 с.
10. Соломенцев Е. Д. Функции комплексного переменного и их применения. М.: Высш. шк., 1988. 167 с.
11. 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.

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 25.03.24; одобрена после рецензирования 12.06.24; принята к публикации 23.08.24.

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, Priority 2016.12.29, Published 2017.06.13. (in Russ.)
3. Ryvkin A.A., Ryvkin A.Z., Khrenov L.S. *Spravochnik po matematike* (Handbook of Mathematics), Moscow, 1987, 480 p. (in Russ.)
4. Shilin A.N. *Measurement Techniques*, 1989, no. 10, pp. 8–10. (in Russ.)
5. Shilin A.N. *Journal of Instrument Engineering*, 1999, no. 5-6(42), pp. 44–47. (in Russ.)
6. Gebel I.D. *Measurement Techniques*, 1973, no. 3, pp. 24–27. (in Russ.)
7. Gebel I.D. *Measurement Techniques*, 1978, no. 11, pp. 16–19. (in Russ.)
8. Sergeev S.A., Gorokhov L.Ya. *Journal of Instrument Engineering*, 1999, no. 5-6, pp. 32–37. (in Russ.)
9. Berliner Yu.I., Balashov Yu.A. *Tekhnologiya khimicheskogo i neftyanogo apparatostroyeniya* (Technology of Chemical and Oil Apparatus Engineering), Moscow, 1976, 256 p. (in Russ.)
10. Solomentsev E.D. *Funktsii kompleksnogo peremennogo i ikh primeneniya* (Functions of a Complex Variable and Their Applications), Moscow, 1988, 167 p. (in Russ.)
11. Shilin A.N., Shilin A.A., Atamanyuk R.G. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 8(66), pp. 671–679. (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 25.03.24; approved after reviewing 12.06.24; accepted for publication 23.08.24.