

Метрологический анализ оптико-электронных систем контроля профилограмм оболочек вращения

А. Н. ШИЛИН, Д. Г. СНИЦАРУК

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия, e-mail: eltech@vstu.ru

Проведён метрологический анализ оптико-электронных систем контроля профилограмм оболочек вращения. Исследованы оптико-электронные системы, реализующие различные методы поиска центра детали. Рассмотрена математическая модель оболочки вращения, заданная профилограммой. По результатам моделирования получена зависимость абсолютной методической погрешности от данного коэффициента и сделаны выводы о целесообразности применения той или иной системы в зависимости от необходимой точности и быстродействия.

Ключевые слова: оболочка вращения, метод поиска центра тяжести, геометрические параметры, спектральный анализ, система контроля, профилограмма.

Metrological analysis of opto-electronic systems for monitoring profilograms of shells of revolution was carried out. Optoelectronic systems, realizing various methods of searching for the center of details, are investigated. A mathematical model of the shell of revolution, defined by a profilogram, is considered. Based on the simulation results, the dependence of the absolute methodical error on how to do this is obtained.

Key words: shell of rotation, method of center search, geometric parameters, spectral analysis, , monitoring system, profilogram.

Машиностроение – одна из основных отраслей промышленности, оказывающих влияние на экономическое развитие страны. Современный рынок постоянно диктует требования к повышению качества выпускаемой продукции и снижению её себестоимости. Особенно это актуально при производстве крупногабаритного корпусного нефтегазового и энергетического оборудования, а также при разработке и создании аэрокосмической техники. Перечисленная продукция, как правило, выпускается мелкими сериями, имеет широкий диапазон габаритных размеров и технических характеристик. Основными базовыми деталями такого оборудования являются детали типа оболочек вращения – обечаек, изготавливаемые методом гибки из листового материала в нагретом состоянии. Технологическая точность при выпуске оболочек вращения оказывает существенное влияние на производительность работ при сборке–монтаже оборудования и на эксплуатационные характеристики готовой продукции, в первую очередь – надёжность. Таким образом, технологическая точность при изготовлении обечаек определяет качество готовой продукции.

Проблемы управления качеством особенно актуальны в атомном машиностроении, поскольку надёжность выпускаемых изделий – атомных электрических станций (АЭС) и атомных станций теплоснабжения (АСТ) также зависит от технологической точности изготовления базовых деталей и узлов этих станций. Поэтому внедрение в технологические процессы современных информационно-измерительных и управляющих систем помогает значительно повысить качество сборки АЭС и АСТ.

Отметим, что производство свыше 60 % деталей должно сопровождаться контролем их геометрических параметров [1], при этом в машиностроении более 70 % изделий имеют цилиндрические поверхности [2]. На предприятиях часто применяют контактные измерительные устройства, либо оптические приборы на

основе теодолита [3, 4]. Для решения задач контроля геометрических параметров крупногабаритных обечаек разработаны специальные оптико-электронные измерительные системы (ОЭИС), в которых реализованы проекционные и дальнометрические схемы измерения [5–7]. Такие ОЭИС обладают меньшими по сравнению с изготавливаемой деталью габаритными размерами и могут оперативно выполнять бесконтактные измерения. В настоящее время в связи с развитием оптоэлектроники и цифровых систем обработки оптической информации ОЭИС интенсивно внедряются в различные отрасли промышленности, а оптико-электронные системы на основе цифровых камер широко используются для распознавания изображений. Основной характеристикой данных измерительных систем является точность, поэтому на этапе проектирования ОЭИС очень важен обоснованный выбор оптических схем, обеспечивающих правильность и достоверность измерений.

Технологическая точность создания обечаек определяется профилограммами поперечного сечения, т. е. зависимостью измеренного радиуса r детали от угла φ поворота измерительного преобразователя относительно точки, координаты которой принимаются за центр детали. На правильность регистрации профилограммы существенно влияет точность определения координат её центра, так как при смещении центра профилограммы относительно центра сечения детали возникает дополнительная погрешность, обусловленная отклонением расстояния от преобразователя до окружности номинального размера детали [5]. Поэтому основной проблемой при регистрации профилограмм с необходимой точностью является разумный и логичный выбор её центра. В настоящее время существует несколько методов определения центра профилограммы, однако не все они применимы для крупногабаритных обечаек, изготавливаемых на валковых листогибочных машинах при бесцентровом вращении детали.

С помощью имитационного моделирования авторы настоящей статьи провели метрологический анализ основных методов поиска центра профилограмм: по геометрическому центру тяжести [8–10], метода прямоугольника [10–12] и спектрального метода [13–15].

Генерация профилограммы. Для анализа методических погрешностей методов определения центра профилограммы использовали специальный алгоритм, согласно которому разработали программу для генерирования случайных профилей обечаек. Программа позволяла получить массивы координат профилограммы в полярных (r_i ; φ_i) и декартовых (x_i ; y_i) координатах.

При имитационном моделировании авторы приняли следующие допущения:

отклонения от номинального радиуса не превышают допуска на размер детали;

амплитуда первой гармонической составляющей, определяющей эксцентриситет, равна нулю;

отклонения радиуса и фазовых углов являются случайными независимыми величинами;

начальные фазы гармоник принимают случайные значения согласно равновероятному закону распределения.

При генерации профилограммы обечаек авторы учли особенность технологического процесса изготовления обечаек на листогибочном оборудовании, а именно – преобладание второй гармонической составляющей (эллипсность). При моделировании функцию профиля $r(\varphi)$ обечаек представили рядом Фурье [16–18]:

$$r(\varphi) = (R + \Delta r) + \sum_{k=1}^{10} A_k \cos(k\omega - \omega_k), \quad (1)$$

где R – номинальный радиус детали; Δr – погрешности измерения радиуса R в пределах допуска ΔR , составляющего 1 % номинального радиуса; A_k , ω_k – значения амплитуды и фазы k -й гармоники, соответственно.

Случайные значения начальных фаз гармоник рассматривали в диапазоне $(0; 2\pi)$, а значения второй и последующих гармоник амплитуды A_k задавали согласно уравнению:

$$A_k = 0,8\Delta R - \sum_{k=3}^{10} e^{-\beta k},$$

где β – безразмерный коэффициент, учитывающий спектральный состав профилограммы.

Моделирование проводили при следующих численных параметрах: угловой шаг $0,1^\circ$; номинальный радиус $R=500$ мм, допуск $\Delta R=0,5$ мм, коэффициент $\beta=0\dots 0,5$ с шагом в $0,05$ для каждой партии обечаек.

Метод геометрического центра тяжести. Для моделирования процесса определения центра профилограмм по методу геометрического центра тяжести авторы сгенерировали профилограмму обечаек в полярной системе координат согласно формуле (1). Для удобства обработки информации профилограмму перевели в прямоугольную систему координат. По найденным точкам построили изображение профиля детали и залили его контрастным с фоном цветом (рис. 1). Затем изображение разбили на элементы (пиксели). Полученную фигуру считали однородной.

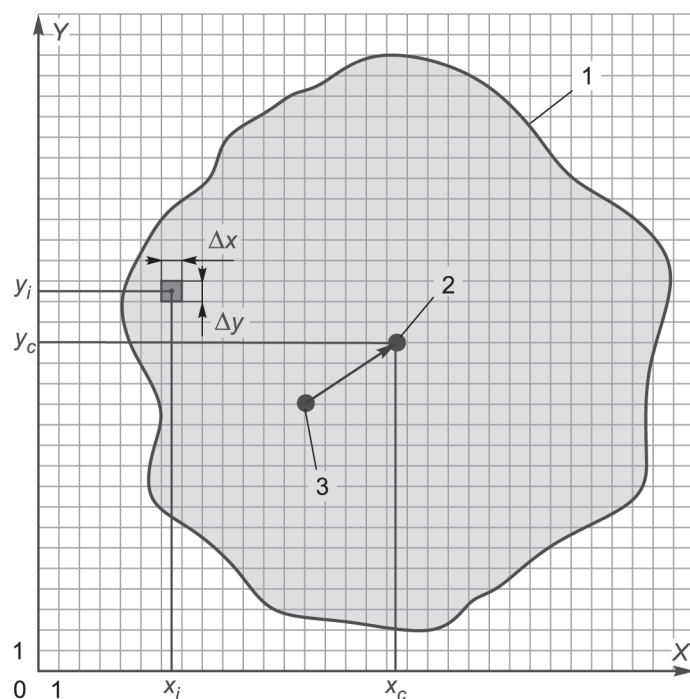


Рис. 1. Метод поиска геометрического центра тяжести: 1 – контур детали; 2 – найденный центр; 3 – первоначальное положение камеры

Координаты центра детали (x_c ; y_c) определили по формуле

$$x_c = I_x / S; \quad y_c = I_y / S,$$

где $I_x = \sum_D x_{1i} \Delta x \Delta y$ – статический момент относительно оси абсцисс; x_{1i} – координата конкретного элемента (пикселя) по оси абсцисс; Δx , Δy – элементы, принадлежащие площади фигуры, которая ограничена контуром детали; $S = \sum_D \Delta x \Delta y$ – площадь фигуры, ограниченной контуром детали; $I_y = \sum_D y_i \Delta x \Delta y$ – статический момент относительно оси ординат; x_{2i} – координата конкретного элемента (пикселя) по оси ординат.

Метод геометрического центра тяжести является наиболее точным, и поэтому в метрологическом анализе его часто применяют как образцовый.

Спектральный метод. При моделировании спектрального метода профилограмму, описанную формулой (1), генерировали, после чего находили координаты её центра по первой гармонической составляющей спектра.

Для этого сначала вычисляли комплексное значение первой гармоники:

$$\text{Re} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} r_k \sin \varphi_k;$$

$$\text{Im} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} r_k \cos \varphi_k,$$

где N – число отсчётов профилограммы; r_k – радиус-вектор отсчёта; φ_k – угол отсчёта.

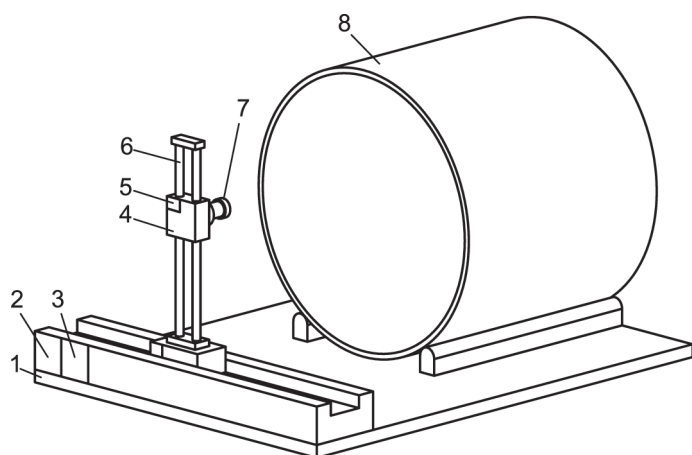


Рис. 2. Оптико-электронная система контроля профилей оболочек вращения, реализующая поиск центра детали через поиск геометрического центра тяжести

1 – основание двухкоординатного механизма; 2 – управляющая вычислительная машина; 3 – микроконтроллер; 4 – шаговый двигатель; 5 – драйвер шагового двигателя; 6 – направляющие каретки двухкоординатного механизма; 7 – цифровая камера; 8 – оболочка

Затем по найденному значению рассчитывали координаты центра детали (x_c ; y_c):

$$x_c = -\sqrt{Re^2 + Im^2} \frac{\sin[\arctg(Im/Re)]}{2},$$

$$y_c = -\sqrt{Re^2 + Im^2} \frac{\cos[\arctg(Im/Re)]}{2}.$$

Если значение смещения центра детали относительно центра преобразователя значительно превышало допуск на размер детали, то для повышения точности преобразователь перемещали по двум координатам до совмещения центров, после чего определяли профилеграмму.

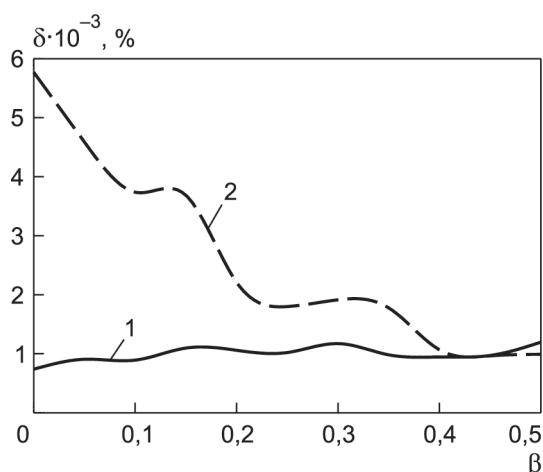


Рис. 3. Относительная погрешность δ определения центра, полученная спектральным методом (1) и методом прямо-угольника (2), в зависимости от параметра β

Метод прямоугольника. При моделировании процесса поиска центра профиля по методу прямоугольника профилеграмму оболочки генерировали в декартовых координатах. Далее определяли минимальные $x_{\min}$, $y_{\min}$ и максимальные $x_{\max}$, $y_{\max}$ координаты профиля по осям ординат и абсцисс. После этого вычисляли длину и ширину прямоугольника, описывающего данную фигуру. С помощью найденных значений получали координаты центра детали:

$$x_c = (|x_{\max}| + |x_{\min}|)/2;$$

$$y_c = (|y_{\max}| + |y_{\min}|)/2.$$

Техническая реализация методов. Изложенные выше методы можно реализовать с помощью одной аппаратной платформы, так как они отличаются лишь алгоритмом сбора и обработки информации. На рис. 2 приведено изображение оптико-электронной системы контроля профилеграмм оболочек вращения. Поиск центра выполнен методом поиска геометрического центра тяжести.

На первом этапе измерений оболочку 8 установили на основание 1 двухкоординатного механизма перемещения цифровой камеры 7. При этом камеру разместили так, чтобы вся торцевая плоскость детали находилась в её поле зрения. Полученное изображение регистрировали в памяти управляющей вычислительной машины 2. ЭВМ представляет собой отдельный блок, аппаратно реализуемый одноплатным компьютером в металлическом корпусе, который встраивается в основание. С этого компьютера данные передаются по беспроводным или проводным каналам связи. Данное изображение обрабатывали по одному из алгоритмов в зависимости от выбранного метода. В результате работы применённого алгоритма авторы определили координаты центра профилеграммы.

На втором этапе использовали микроконтроллер 3, который подавал сигналы на драйвер 5 шагового двигателя 4. Под управлением микроконтроллера цифровая камера перемещалась по направляющим каретки двухкоординатного механизма 6 таким образом, чтобы центр изображения совпадал с центром детали. Затем регистрировали ещё одно изображение, по которому впоследствии и снимали профилеграмму.

Результаты моделирования. В процессе моделирования, программа, разработанная авторами, генерировала партию из 100 оболочек, имеющих одно значение коэффициента β , который учитывает спектральный состав профилеграмм. После этого, применив каждый из методов, нашли координаты центра профилеграммы. Затем вычислили относительную погрешность δ поиска координат центра для каждого из методов измерения:

$$\delta = \frac{|\sqrt{x_0^2 + y_0^2} - \sqrt{x_c^2 + y_c^2}|}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \cdot 100,$$

где x_0 , y_0 – координаты смещения центра, определённого методом геометрического центра тяжести; x_c , y_c – координаты смещения центра, найденные одним из оставшихся методов.

Средние значения абсолютной погрешности для каждого из методов в зависимости от коэффициента β представлены на рис. 3. Таким образом, результаты моделирования показали, что метод прямоугольника обладает максимальной точностью только при увеличении коэффициента β , и поэтому этот метод целесообразно использовать для деталей, у которых форма поперечного сечения близка к эллипсу. Как отмечалось выше, обечайки, изготовленные на валковых листогибных машинах, имеют именно такую форму. Ещё более высокая точность наблюдается при применении спектрального метода, погрешность которого остаётся постоянной при всех значениях коэффициента β .

Заключение. Предложена методика обоснованного выбора оптической схемы контроля профилограмм оболочек вращения и структурно-функциональная схема оптико-электронной схемы системы. При выборе варианта схемы учитывался технологический процесс производства обечайек, технические характеристики продукции, уровень автоматизации производства, инвестиционные затраты и т. д. Из проведённого анализа следует, что для технической реализации оптико-электронной системы целесообразно использовать спектральный метод и метод геометрического центра тяжести, которые позволяют осуществлять контроль с минимальными методическими погрешностями. Оптико-электронные системы, реализующие эти методы, должны содержать цифровые устройства для обработки оптической информации.

В статье представлены результаты исследований, выполненных по программе Erasmus+ № 573879-EPP-1-2016-1-FREPPKA2-CBHE-JP «Internationalisation of master Programs In Russia and China in Electrical engineering».

Л и т е р а т у р а

1. **Никифоров А. Д.** Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. М.: Высшая школа, 2000.
2. **Марков Н. Н.** Основные направления развития и задачи автоматизации измерения линейных и угловых размеров в машиностроении // Механизация и автоматизация линейно-угловых измерений: Материалы семинара. М.: МДНТП, 1985.
3. **Пат. 2142111 РФ**, МПК G01B5/20, МПК G01B5/28. Устройство для измерения неровности внутренней поверхности цилиндрической обечайки / В. Б. Шарапов, Ю. Л. Параунин // Изобретения. 1999. № 33.
4. **Пат. 28700 РФ**, МПК E01C 23/07 / G01C 7/04. Устройство для снятия профилограмм поверхностей / А. С. Павлюк, М. И. Семенов, С. А. Павлюк // Изобретения. 1999. № 10.
5. **Никифоров А. Д.** Точность в химическом аппарато-строении. М.: Машиностроение, 1969.
6. **Сысоев Ю. С.** Координатные методы определения параметров средней окружности при анализе профиля реальной окружности // Измерительная техника. 1995. № 10. С. 22–25.

7. **Шилин А. Н., Гиркин М. В.** Анализ алгоритмов оптико-электронной системы контроля кривизны профиля обечайек // Приборы. 2009. № 5. С. 51–57.
8. **Шилин А. Н.** Анализ методов и схем измерения геометрических параметров обечайек в процессе их формообразования // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2002. № 8. С. 24–28.
9. **Шилин А. Н., Сницарук Д. Г.** Оптико-электронная система контроля профилограмм внутренних поверхностей обечайек // Известия ВолгГТУ. Серия Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. Вып. 12. Волгоград, 2015. № 11 (176). С. 74–79.
10. **Тарг С. М.** Центр инерции (центр масс). Физическая энциклопедия в 5 т. / Под ред. А. М. Прохорова. М.: Большая российская энциклопедия. Т. 5. Стробоскопические приборы. Яркость. М.: Наука, 1999.
11. **Пат. 159150 РФ**, МПК G01B11/00. Оптико-электронное устройство для измерения размеров обечайек / Д. Г. Сницарук, А. Н. Шилин // Изобретения. Полезные модели. 2016. № 16.
12. **Шилин А. Н., Сницарук Д. Г., Степанов А. А.** Оптико-электронный дальнометрический прибор контроля профилограмм обечайек // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2017. № 2 (19). С. 53–57.
13. **Шилин А. Н., Сницарук Д. Г.** Оптическое устройство для контроля отклонений диаметров крупногабаритных оболочек вращения // Прикладная оптика – 2016: XII Междунар. конф. Сб. трудов. Т. 2. Оптико-электронные приборы для промышленности, медицины. Метрология, стенды. Цифровая обработка информации, иконика. С.-Петербург, 2016. С. 218.
14. **Пат. 2426067 РФ**, МПК G 01 B 5/00. Способ измерения геометрических параметров оболочки вращения / С. А. Петров, А. Н. Шилин // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 22.
15. **Шилин А. Н., Петров С. А.** Определение центров профилограмм обечайек при сборке корпусов нефтеаппаратуры // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 9. С. 15–19.
16. **Сизенов Л. К.** Суммирование погрешностей размеров и формы в поперечном сечении цилиндрических деталей // Известия вузов. Приборостроение. 1969. № 11. С. 134–138.
17. **ОСТ 26291–94.** Сосуды и аппараты. М.: Изд-во ВНИИ-НЕФТЕМАШ, 1994.
18. **Гебель И. Д.** Бесцентровое измерение формы профиля тел вращения // Измерительная техника 1973. № 3. С. 24–27.
19. **Грузман И. С.** Цифровая обработка изображений в информационных системах. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002.
20. **Bradley D., Roth G.** Adaptive thresholding using the integral image // ACM J. Graph. Tools. 2007. V. 12(2). P. 13–21.
21. **Якушев А. И., Воронцов Л. Н., Федотов Н. М.** Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. 6-е издание, переработанное и дополненное. М.: Машиностроение, 1986.

Дата принятия: 18.04.2018.