

Некоторые аспекты определения формы крупногабаритных тел вращения в поперечном сечении

Т.В. Бондаренко, Е.А. Федотов

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
Белгород*

Аннотация: Одной из проблем машиностроения является определение и измерение геометрической формы крупногабаритных деталей машин и механизмов, которые достаточно часто являются телами вращения. Подобные детали используются с высокой интенсивностью в соединениях барабанного типа. Поэтому требуется диагностика деталей для определения возможности их дальнейшего использования. Одним из критериев при этом выступает форма поверхности детали и ее отклонение от нормативных значений. В рамках данной статьи рассматриваются некоторые аспекты метода оценки формы крупногабаритных тел вращения, позволяющего выполнять измерения с высокой точностью, для деталей сколь угодно больших габаритов.

Ключевые слова: крупногабаритные детали, крупногабаритные кольца, отклонения от круглости, тело вращения

Для того чтобы определить состояние тела вращения необходимо измерить форму его контура и сопоставить полученные результаты с нормативными значениями. Проблема измерения формы тела вращения крупногабаритных деталей (диаметром более 2 м) на сегодняшний день не имеет эффективных способов решения. Простые, дешевые и легко переносимые приборы не обладают высокой точностью, а часто не могут быть использованы для определения формы крупногабаритного тела [1,2]. Используемые в настоящее время способы получения профиля детали основаны на введении специальной системы координат (базы), в которой вычисляются координаты точек детали и выполняется построение аппроксимационной поверхности. Такой подход является достаточно сложным и дорогим в применении. Сложность и стоимость измерений можно снизить, используя новые алгоритмы обработки данных о детали, которые собирают недорогие и мобильные измерительные приборы. Новый алгоритм

обработки данных разрабатывается для кольцеобразных крупногабаритных тел на основании метода максимального правдоподобия.

Основные критерии, которым должен удовлетворять метод — это точность, мобильность и отсутствие ограничения на габариты детали. Точность задает максимально допустимое отклонение реального профиля детали от того, который строится методом. Мобильность характеризует возможность построения профиля произвольного тела вращения без необходимости вносить изменения в реализацию метода решения. Так как проблема определения формы решена для малых и средних габаритов, то отсутствие ограничения на габариты детали весьма актуально [3, 4].

Существуют различные измерительные системы и программное обеспечение, которое позволяет измерить форму тела вращения. Например, приборы-тележки, координатно-измерительные машины МИКРОТЕХ [5], измерительная система RollCal™ 3 [6], накладные кругломеры RON-PILOT [7]. На основании анализа которых, можно сделать вывод, что существующие системы являются громоздкими, тяжелыми, конструктивно сложными, достаточно дорогостоящими и требуют длительного времени работы, не рассчитаны на измерение формы деталей, диаметр которых превышает 2,5 м. [8,9].

При эксплуатации деталей режущие элементы механизмов формируют на поверхности этих деталей различные дефекты в виде шероховатости и волнистости. Геометрическая форма тела вращения представляет собой комплексное значение, содержащее в себе следующие компоненты:

1. форма отдельных сечений,
2. форма профиля продольного сечения [10].

Одни из основных дефектов, которые имеет поверхность тела вращения □ это отклонение от круглости, которое показывает расстояние между точками действительного профиля детали и идеального,

совпадающего с окружностью. Наиболее распространенные варианты отклонения от круглости — это овальность и огранка.

Огранка — это вид отклонения от круглости, когда реальный профиль детали является многогранной фигурой.

Также поверхность может обладать такими дефектами, как наличие шероховатости поверхности и ее волнистость.

Шероховатость поверхности \square это объединение всех неровностей поверхности, взятое с достаточно небольшим шагом. Волнистость по ГОСТ 25142–8 – это неровности, для которых значение шага лежит в интервале $[0.8 \div 1; 10]$ миллиметров [11].

Рассмотрим метод, разработанный для определения формы крупногабаритных тел вращения в поперечном сечении. В ходе анализа литературы, было найдено два подхода, позволяющих выполнить аппроксимацию профиля тела вращения. Первый подход основан на представлении поперечного контура тела в виде ряда Фурье.

$$r = r_0 + \sum [a_i \cos(i\varphi) + b_i \sin(i\varphi)], \quad (1)$$

где r_0 – это константная часть отклонения контура, представляющая собой среднее значение функции за период 2π ; a_i , b_i – величины, показывающие уровень проявления отклонений реального контура от среднего радиуса, соответствуют коэффициентам i -ой гармоники ряда Фурье.

Также существует возможность записать ряд Фурье в следующей форме:

$$r = r_0 + \sum [c_i \cos(i\varphi + \varphi_i)] \quad (2)$$

где c_i – величина равная амплитуде; φ_i – величина, соответствующая фазе. Начальный член разложения c_1 показывает несоответствие реального центра вращения и эксцентриситета сечения. Следующий член разложения c_2 показывает отклонение от круглости \square овальность. Член разложения c_3 показывает отклонение от круглости \square огранку. Члены разложения, начиная

с c_4 , показывают такие дефекты, как шероховатость поверхности и ее волнистость [12].

При разложении в ряд Фурье совпадают геометрический центр плоской фигуры и центр тяжести. Математическая модель, которая использовалась для разработки алгоритмов обработки данных, представлена на рис. 1.

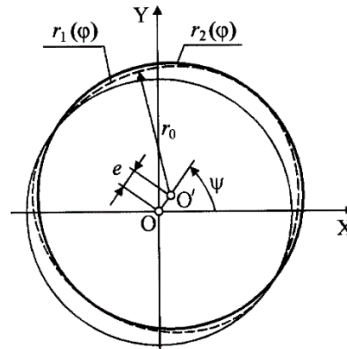


Рис. 1. – Представление поперечного сечения в виде графика функции

Существует способ представления контура тела вращения в виде выпуклой замкнутой кривой, которую образуют плавно соединенные в узловых точках окружности. Указанные окружности проходят по очереди через три точки с шагом, значение которого равно одному узлу. Контур детали в сечении задается с помощью кривой Безье с положительной кривизной [8, 12].

Для определения профиля детали с помощью разрабатываемого метода, используется прибор, оснащенный лазерным датчиком, который выполняет обкатку детали, схема прибора представлена на рис.2.

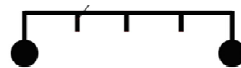


Рис. 2. – Схема прибора

На одном из колёс прибора расположен фотоэлемент, подающий сигнал при прохождении прибором расстояния, которое равно длине дуги колеса. На планке прибора помещено три лазерных датчика. Фотоэлементы, закрепленные на приборе, подают сигналы. После получения сигнала лазерные датчики, измеряют расстояние до поверхности, которая

подвергается обработке. Затем полученные расстояния с помощью интерфейса RS-232 передаются на подключенный персональный компьютер или ноутбук. Измеренные таким образом расстояния составляют начальную компоненту вектора измерений $R^T = [R_1, R_2, \dots, R_k]$.

Следующая компонента вектора R^T формируется из длин хорд, построенных между выделенными точками, которые отмечаются заранее в процессе разметки поверхности тела вращения, как показано на рис. 3.

Для такого подхода количество используемых членов ряда Фурье (2), число построенных хорд, погрешности при построении и вычислении хорд на профиле, погрешности при выполнении предварительной разметки профиля оказывают влияние на точность оценки, которая может быть достигнута. Кроме того, точность решения зависит от используемого прибора и его калибровки, а также точности измерения, которую дают лазерные датчики.

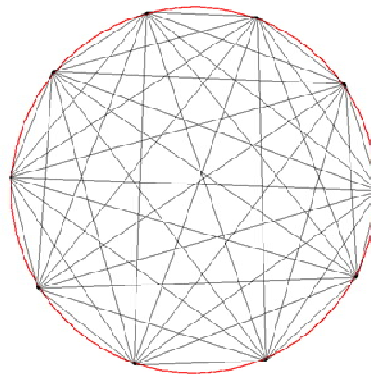


Рис. 3. – Хорды на профиле

Лазерные датчики, закрепленные на приборе, L_1, L_2, L_3 выполняют измерения в определенные моменты времени, при этом замеряется расстояние между базами самих датчиков и поверхностью, которая обрабатывается, см. рис. 4. В координатной плоскости OXY задается поверхность, по которой двигается прибор. Для задания поверхности используется ряд Фурье (1). Также в плоскости задается точка касания правого ролика, затем находятся оставшиеся координаты прибора (центры

роликов, координаты датчиков и т.д.). Определив все необходимые значения координат, можно найти значения s_1, s_2, s_3 , которые соответствуют расстояниям между датчиком прибора и обкатываемой поверхностью.

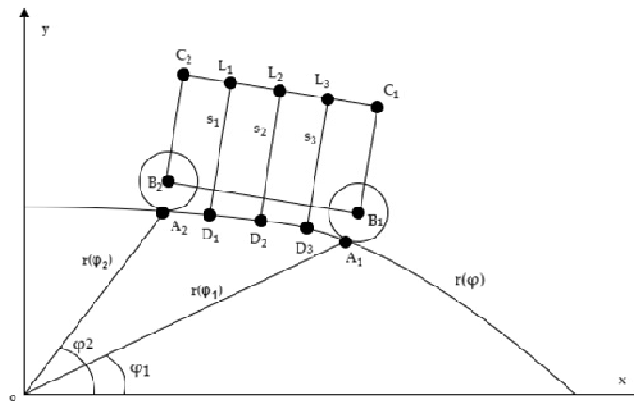


Рис. 4. – Обкатка поверхности прибором с датчиками

Главной задачей является вычисление рассмотренных выше расстояний.

Выполним вычисление значений координат центра правого ролика (точка B_1). Предварительно необходимо найти координаты точки касания этого ролика. Для этого введем угол φ_1 – полярный угол касания правого ролика. Подставив значение φ_1 в ряд Фурье, получим величину, равную полярному радиусу $r(\varphi_1)$. В итоге получим значения координат для точки касания правого ролика, как показано на рис. 5. Применяя известные операции с прямыми на плоскости и вычисленные значения координат, можно найти значения координат центра правого ролика. Искомые координаты имеют вид:

$$X_{B1} = X_{A1} + r \cos(a_H); Y_{B1} = Y_{A1} + r \sin(a_H)$$
$$a_H = \arctg\left(-\frac{1}{\operatorname{tg}(a_k)}\right), \operatorname{tg}(a_k) = \frac{r'(\varphi) \sin(\varphi) + r(\varphi) \cos(\varphi)}{r'(\varphi) \cos(\varphi) - r(\varphi) \sin(\varphi)}$$

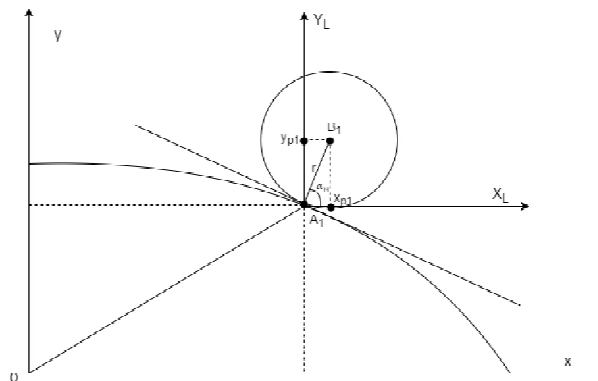


Рис. 5. – Нахождение координат точки B_1

Координаты точки B_2 — центра левого ролика, находятся аналогичным образом (рис.6).

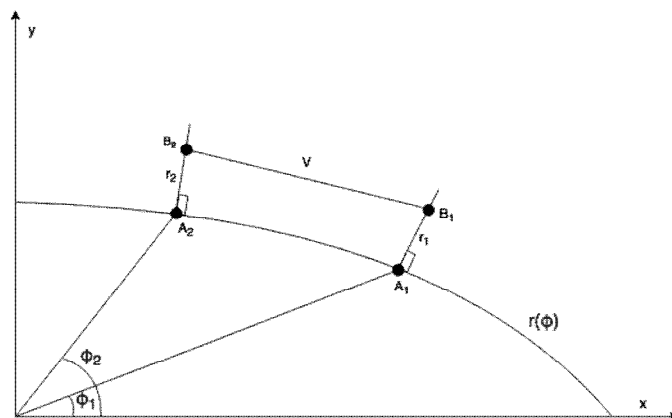


Рис. 6. – Нахождение точки B_2

Зная координаты центров роликов можно составить уравнение прямой, которая проходит через эти точки:

$$y_{B_2B_1} = Ax + By + C = (y_{B_2} - y_{B_1})x + (x_{B_1} - x_{B_2})y + x_{B_2} * y_{B_1} - x_{B_1} * y_{B_2}$$

Уравнение прямой B_2C_2 , перпендикулярной B_2B_1 , проходящей через точку B_2 :

$$y_{B_2C_2} = -\frac{1}{K_{B_2B_1}}x + \frac{x_{B_2}}{K_{B_2B_1}} + y_{B_2}$$

Уравнение прямой B_1C_1 :

$$y_{B_1C_1} = -\frac{1}{K_{B_2B_1}}x + \frac{x_{B_1}}{K_{B_2B_1}} + y_{B_1}$$

Используя составленные уравнения прямых, находим координаты точки C_2 :

$$C_2 : \left(\frac{x_E - x_{B2}}{|B_2E|} d + x_{B2}; \frac{y_E - y_{B2}}{|B_2E|} d + y_{B2} \right)$$

Выполнив аналогичные действия, можно найти правую точку крыши прибора C_1 :

$$C_2 : \left(\frac{x_E - x_{B1}}{|B_1E|} d + x_{B1}; \frac{y_E - y_{B1}}{|B_1E|} d + y_{B1} \right)$$

Выполнив указанные выше действия, можно найти уравнение прямой, которая проходит через крышу прибора и координаты лазерных датчиков. Чтобы выполнить эти действия необходимо для этого вводится приборная система координат $O_{II}X_{II}Y_{II}$, представленная на рис.7.

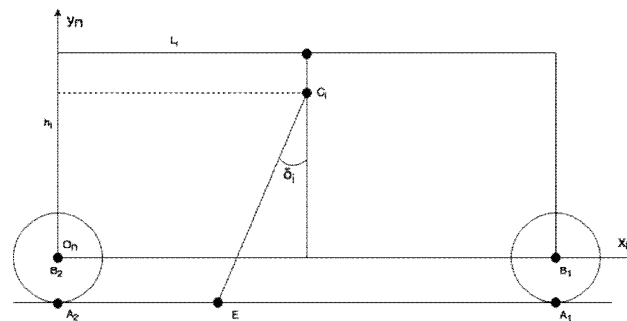


Рис. 7. – Приборная система координат

От левой точки крышки прибора можно отмерить расстояние, однако при этом значения координат датчика будут получены без соответствующей калибровки. Для решения задачи необходимо использование точных значений координат датчиков, то есть полученные после калибровки прибора. Таким образом, необходимо учитывать верхнее смещение относительно крышки прибора, то есть учитывать точку C_i и угол наклона датчика δ_i . Если осуществить поворот прямой относительно точки C_i на указанный угол δ_i , то будет учтен угол наклона прибора. Выполнив указанные преобразования, сформируем уравнения прямых, которые совпадают с уравнениями, задающими ход лучей лазерных датчиков прибора. Полученные прямые находятся с помощью вычисленных декартовых

координат точек системы, а в записи ряда Фурье используются полярные координаты. Следовательно, необходимо выполнить следующие преобразования:

$$x = r \cos(\varphi)$$

$$y = r \sin(\varphi)$$

$$\begin{cases} r \sin(\varphi) = kr \cos(\varphi) + b \\ r = r_0 + \sum_{i=0}^N (a_i \cos(i\varphi) + b_i \sin(i\varphi)) \end{cases}$$

$$\begin{cases} r = \frac{b}{\sin(\varphi) - k \cos(\varphi)} \\ r = r_0 + \sum_{i=0}^N (a_i \cos(i\varphi) + b_i \sin(i\varphi)) \end{cases}$$

Сформированную систему уравнений можно решить одним из известных методов решения. Например, методом Ньютона возможно найти решение следующего уравнения:

$$\left(r_0 + \sum_{i=0}^N (a_i \cos(i\varphi) + b_i \sin(i\varphi)) \right) (\sin(\varphi) - k \cos(\varphi)) - b = 0$$

Начальное приближение к решению уравнения приравнивается к величине угла, соответствующего точки касания для правого ролика прибора. Решением полученного уравнения будут величины углов для точек, которые соответствуют концам лучей лазерных датчиков, закрепленных на приборе. После подстановки найденных углов с выражение для ряда Фурье можно определить координаты искомых точек. Рассмотренный метод может быть использован для оценки формы профиля, вращающегося на опорах крупногабаритного кольца. Предварительный выбор и исследование параметров измерительного эксперимента для определенного крупногабаритного кольца, позволяет повысить точность измерения прибором. Однако поиск и выражение реальных значений характеристик вращающегося крупногабаритного кольца, например, кривизны средней линии, представляет собой главную сложность при определении формы тела

вращения, рассмотренным методом. При этом все перечисленные параметры оказывают влияние на значения искомой величины — расстояния от лазерных датчиков прибора до поверхности кольца.

Литература

1. Федотов Е.А., Бондаренко Т.В., Федотова В.Н., Поляничка М.И. Анализ средств измерений геометрической формы крупногабаритных тел вращения // Новый университет. Серия: Технические науки, 2015, № 9-10. С. 30-36
2. Бондаренко Т.В. Применение базисных функций при математическом моделировании динамики кольца, базирующегося на двух опорах // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1275
3. Polunin A.I, Smyshlyaeva L.G and Bondarenko T.V. Accounting Of Dynamics Of Standing Waves In A Rotating Ring With Supports // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. №12. pp. 29015-29031
4. Polunin A.I. About The Motion Nature Of Standing Waves With Supporting Ring Variable Speed // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. № 24. pp. 44992-45002
5. Координатно-измерительная машина ручная производства МИКРОТЕХ // Microtech URL: microtech.kiev.ua (дата обращения: 15.05.2017)
6. Измерительная система валов Rollcal 3 // ROLLTEST URL: ab-systems.ru/rolltest/en/RollCal3.htm (дата обращения: 15.05.2017)
7. RON-PILOT: the new family of portable roundness testers // Roundness Technologies URL: roundness.ru/ROn-Pilot%20page1.htm (accessed 15.05.2017)
8. Федотов Е.А. О проблемах определения формы тел вращения // VII Международный молодежный форум “Образование. Наука. Производство”. Белгород, 2015. С. 2720-2725
9. Бондаренко Т.В., Федотов Е.А. Динамика крупногабаритного

кольца // VII Международный молодежный форум “Образование, наука, производство”. Белгород, 2015. С. 2627-2631

10. Млокосевич С.Ю. Измерение формы крупногабаритных тел вращения по двум опорным сечениям: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2006. 136 с.

11. Машиностроение: Энциклопедия Т. 3-7: Измерения, контроль, испытания и диагностика / Ред. В. В. Клюев, П. Н. Белянин, 1996. 464 с.

12. Круглова Т.Н., Ярошенко И.В., Мельников М.А., Работалов Н.Н. Метод лазерной диагностики динамической формы ротора гидрогенератора // Инженерный вестник Дона, 2015, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2777

References

1. Fedotov E.A., Bondarenko T.V., Fedotova V.N., Polyanichka M.I. Novyy universitet. Seriya: Tekhnicheskie nauki, 2015, № 9-10. pp. 30-36.
 2. Bondarenko T.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4 URL: ivdon.ru/magazine.archive.n4p2y2012.1275.
 3. Polunin A.I, Smyshlyaeva L.G and Bondarenko T.V. Accounting Of Dynamics Of Standing Waves In A Rotating Ring With Supports. International Journal of Applied Engineering Research. 2015. №12. pp. 29015-29031.
 4. Polunin A.I. About The Motion Nature Of Standing Waves With Supporting Ring Variable Speed. International Journal of Applied Engineering Research. 2015. № 24. pp. 44992-45002.
 5. Koordinatno-izmeritel'naya mashina ruchnaya proizvodstva MIKROTEKh [Hand-held coordinate measuring machine Microtech] URL: microtech.kiev.ua (accessed 15.05.2017).
-

6. Izmeritel'naya sistema valov Rollcal 3 [Measuring system of shafts Rollcal 3] URL: ab-systems.ru.rolltest.en.RollCal3.htm (accessed 15.05.2017).
7. ON-PILOT: the new family of portable roundness testers [Roundness Technologies] URL: roundness.ru.RON-Pilot%20page1.htm (accessed 15.05.2017).
8. Fedotov E.A. VII Mezhdunarodnyy molodezhnyy forum "Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo". Belgorod, 2015. pp. 2720-2725.
9. Bondarenko T.V., Fedotov E.A. VII Mezhdunarodnyy molodezhnyy forum "Obrazovanie, nauka, proizvodstvo". Belgorod, 2015. pp. 2627-2631.
10. Mlokosevich S.Yu. Izmerenie formy krupnogabaritnykh tel vrashcheniya po dvum opornym secheniyam: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. [Change in the shape of large-sized bodies of rotation]. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki, 2006. 136 p.
11. Mashinostroenie: Entsiklopediya [Machine building: encyclopedia] T. 3-7: Izmereniya, kontrol', ispytaniya i diagnostika Red. V. V. Klyuev, P. N. Belyanin, 1996. 464 p.
12. Kruglova T.N., Yaroshenko I.V., Mel'nikov M.A., Rabotalov N.N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive.n1y2015.2777.