

Измерение дефектов геометрии. Алгоритм формирования круглограммы ROUNDTTEST RA-120P

К. Епифанцев, к. т. н.¹

УДК 006.1 | ВАК 2.2.4

В процессе проведения работ по калибровке и при последующем измерении дефектов геометрии используются кругломеры различного типа. В лаборатории цифровой метрологии Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения исследовался кругломер RoundTest RA-120P. Отчет об измерении (в виде круглограммы после проведения измерения круглости, concentричности или осевого биения) на кругломере RoundTest RA-120P формируется программным обеспечением RoundPak. При создании аналогичной программы отечественной разработки очень важным является наличие алгоритма геометрического описания принципа работы электроконтактного щупа с твердосплавным сферическим наконечником и фильтров, заложенных внутри программного обеспечения для возможности применения реверсивного инжиниринга при проектировании прототипа прибора российского производства. Описание алгоритма формирования круглограммы на кругломере ROUNDTTEST RA-120P приводится в статье.

Основное назначение кругломеров – определение отклонений формы и взаимного расположения поверхностей деталей, тел вращения. Работа устройства основана на измерении положения наконечника щупа по отношению к измеряемой детали. В ходе измерений производится непрерывное прощупывание цилиндра по кругу. Кругломеры могут не только вычислять отдельные параметры посредством электронного блока, но и записывать круглограмму. На ней видны характер отклонения (овальность, огранка), а также предельные величины отклонений от идеальной формы профиля. Исследуемый прибор RoundTest RA-120P входит в состав лаборатории цифровой метрологии ФГАОУ ВО ГУАП [1, 2].

Кругломер RA-120 P – высокоточный прибор, использование которого при контроле деталей позволяет обнаружить дефекты геометрии, такие как бочкообразность, конусность, седлообразность и многие другие. ГОСТ 53442-2015 «Основные нормы взаимозаменяемости» регламентирует порядок обозначения данных дефектов и расширяет область рисков получения этих дефектов в связи с развитием цифровых технологий, в том числе технологий аддитивного производства (3D-принтеры),

и увеличением возможностей станков с ЧПУ. Высокая точность указанного оборудования, тем не менее, имеет ряд погрешностей при изготовлении деталей – это вибрации фундамента станка, деформации режущего инструмента, в том числе наклеп, запыленность, физико-химические реакции между обрабатываемым металлом, смазывающе-охлаждающей жидкостью и телом резца. Современные точностные характеристики, касающиеся измерений линейных параметров перестают быть актуальными, поскольку будут контролироваться очень тщательно базовыми инструментами – лазерными тахеометрами, штангенциркулями, микрометрами. Эти инструменты в достаточной мере распространены и имеют сравнительно небольшую стоимость. А приборы для измерения дефектов геометрии имеют большую стоимость, их распространение ограничено, так как они (к ним относятся и кругломеры) производятся только зарубежными компаниями. При этом контроль инструментами типа индикаторы частоты, микрометры-скобы (рис. 1) также возможен, однако вся обработки результатов измерений производится вручную, что осложняет процесс проведения контроля. Указанный выше национальный стандарт ГОСТ Р 53442, а также ГОСТ Р 25346-2013, и ряд зарубежных стандартов подчеркивают возросшую потребность в измерениях формы и месторасположения поверхностей, именно поэтому контроль дефектов геометрии становится важнее контроля дефектов линейного и радиального размерного

¹ ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Россия, доцент, epifancew@gmail.com.

ряда. В стандартах, упомянутых выше, указывается ряд специфических требований, таких как модификатор «Е» – требование Тейлора (значение максимума и минимума материала), свойство Чебышева (требование минимакса), свойство Гаусса. Данные требования обуславливают увеличение внимания инженерного сообщества к контролю геометрии детали. Дефект геометрии, действительно, при должном качестве диаметра может привести к вибрациям, не позволяющим развить большие скорости вращения, что в свою очередь ограничивает достижения важных характеристик ряда двигателей турбинных агрегатов.

При проведении эксперимента на кругломере важной частью начального этапа является центрирование-выравнивание.

Значение отклонений от круглости L_k в мкм определяют из выражения:

$$\Delta L_k = 1000 \cdot \frac{L_k \cdot L'_k}{F}, \tag{1}$$

где $L_k \cdot L'_k$ – расстояние от точки L_k до точки L'_k , мм;

F – коэффициент увеличения контура круглограммы, крат.

На рис. 2а дано схематичное пояснение расположения точек на круглограмме: L_k – точка пересечения луча с контуром круглограммы; L'_k – точка пересечения луча с прилегающей окружностью; $k=1,2...n$ (n – количество точек по числу проведенных лучей).

На рис. 2б поясняется, как определить среднюю окружность круглограммы (выделена зеленым цветом)



Рис. 1. Способы выявления дефектов формообразования: а – калибрами, б – микрометром-поссаметром, в – индикатором часового типа, г – кругломером

и значения отклонений от круглости R_k и R'_k (в мкм), которые вычисляются из выражения

$$\Delta R'_k = 1000 \cdot \frac{R'_k - CL_k}{5000}, \tag{2}$$

где R' – радиус средней окружности, мм;

CL_k – расстояние от центра C' средней окружности до точки L_k .

На круглограмме (см. рис. 2) представлен частный случай определения биения детали. Таким образом, алгоритм программы работает по определению круглости. В процессе определения дефектов геометрии на кругломере будет меняться коэффициент увеличения контура

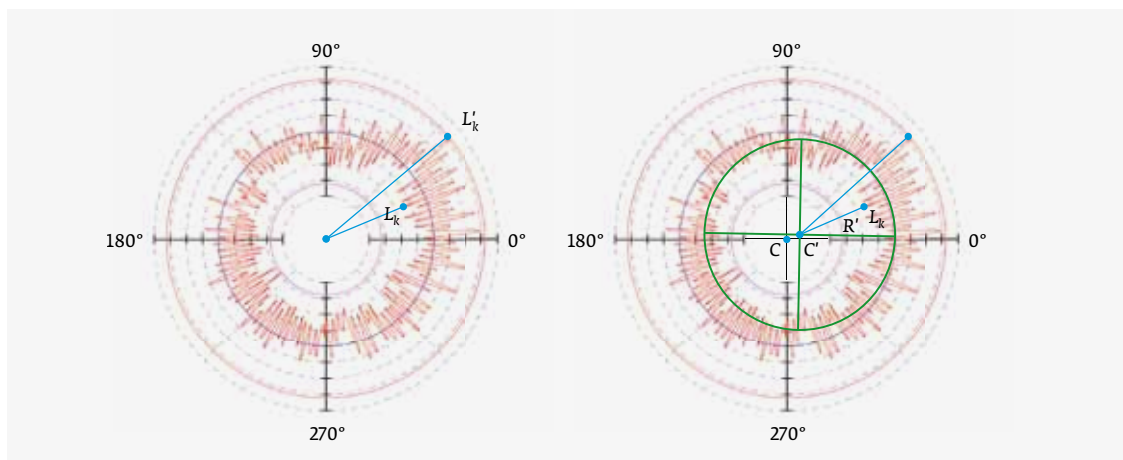


Рис. 2. Расчет круглости

круглограммы, как, например, показано на рис. 3, там он равен 500.

В процессе анализа процессов, происходящих на экране оператора при формировании самой круглограммы, выявлено, что круглограмма представляет собой в общем виде поведенческому фактору улитку Паскаля, которая позволяет многократно применить фильтры для сбора точек с сечения, по которому проходит щуп кругломера [3].

На рис. 4 представлен результат наложения кардиоиды на стандартную круглограмму по измерению биения из программы RoundPak, которая формируется в виде конечного протокола у оператора, определяя по предварительно заданным критериям допуск годности или негодность конечной продукции. При этом уравнения кардиоиды описывается следующим образом [7].

В прямоугольных координатах параметрическая запись кардиоиды имеет вид:

$$\begin{aligned} x &= 2a \cos t - a \cos 2t, \\ y &= 2a \sin t - a \sin 2t. \end{aligned} \quad (3)$$

В полярных координатах кардиоида представлена выражением

$$r = 2a(1 - \cos \varphi). \quad (4)$$

Процесс работы в программе, таким образом, описывает, с одной стороны, геометрический принцип поиска по нормали или по методу вписанных окружностей, а, с другой стороны, использует кардиоиды или улитку Паскаля для формирования визуализированного представления при оценке собранных точек. Процесс фильтрации точек при этом сопровождается фильтрацией Гаусса (рис. 5).

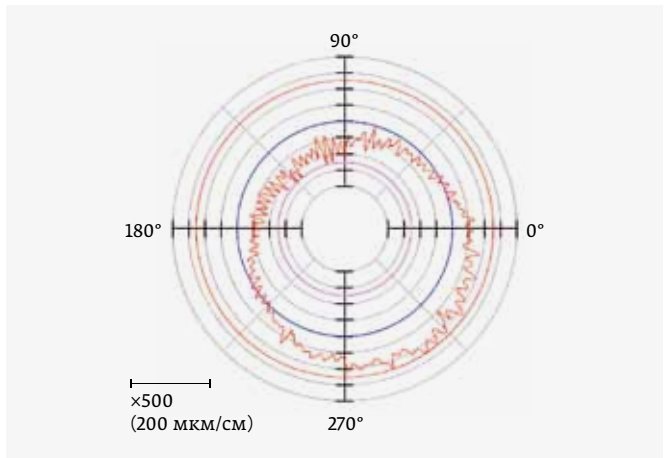


Рис. 3. Пример кратного увеличения

Требование применения фильтра Гаусса было впервые применено в стандарте ИСО и является важным элементом требованием применения фильтра Гаусса при расчете корреляционного анализа, дисперсионного анализа или СКО (рис. 6) [4]. Требования, представленные на рис. 6, являются реализацией выбора специальных видов фильтров (требование Гаусса) или использования возможности применения требования Чебышева.

В рамках обработки экспериментальной задачи необходимо выбрать один из трех критериев:

- среднеквадратичный;
- минимаксный или Чебышева;
- вероятностно-зональный.

Требование Чебышева необходимо для вычисления минимизации суммы квадратов ошибки в узловых точках или для выбора базы в случае измерения дефекта на кругломере:

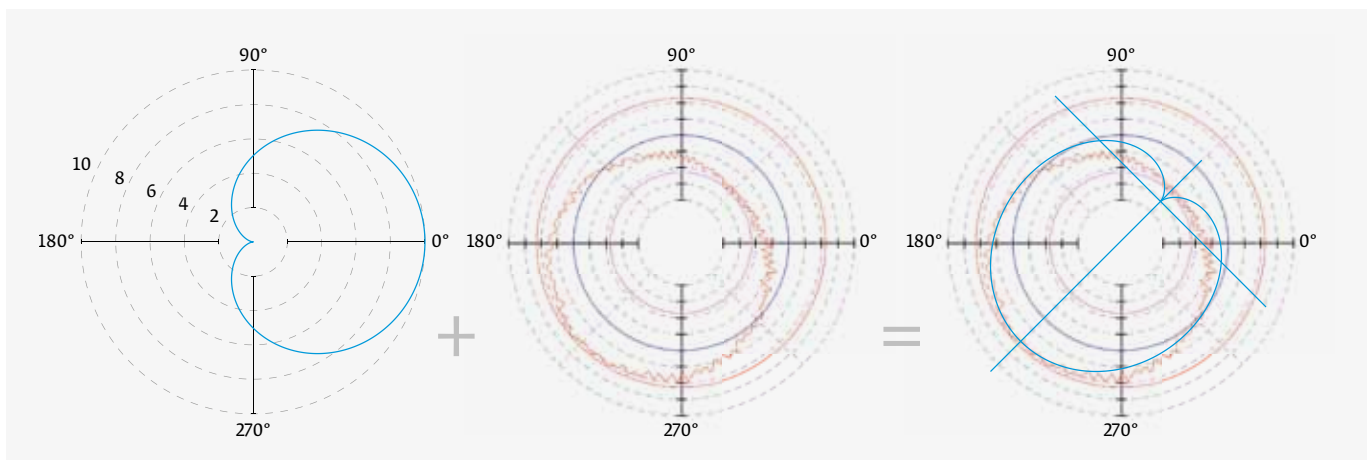


Рис. 4. Наложение кардиоиды

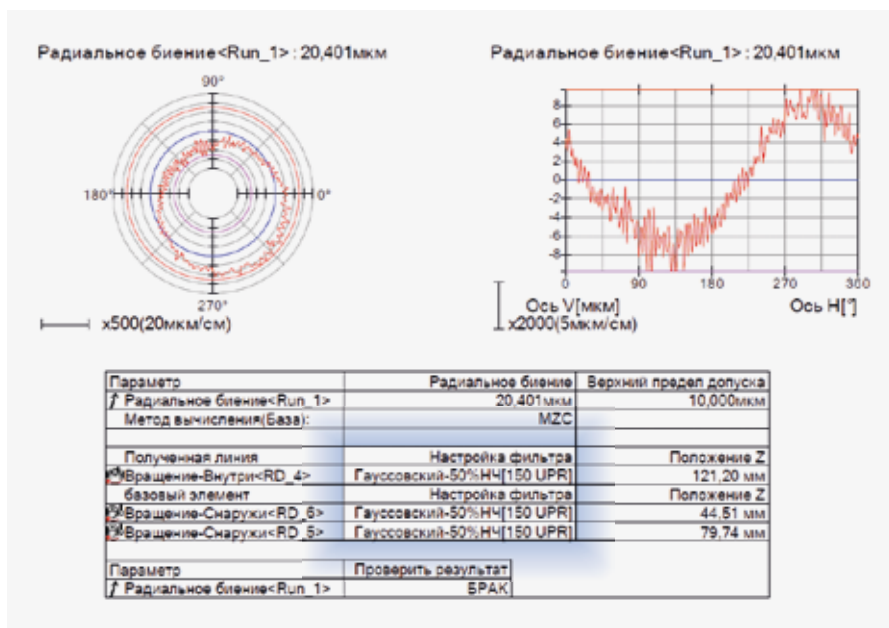


Рис. 5. Результаты расчета через фильтр Гаусса

$$J = \sum_{i=1}^n (F(x_i) - y_i)^2, \quad (5)$$

где y_i – значение исходной функции в точке x_i (табличное); $F(x_i)$ – значение аппроксимирующей функции.

Среднеквадратичный критерий позволяет получить сглаживание кривой, для фильтрации зашумленных данных. Минимаксный критерий Чебышева рассчитывается по формуле [3]:

$$J = \max \left\{ \left| F(x_i) - y_i \right| \right\}. \quad (6)$$

Если применение среднеквадратичного критерия уменьшает среднеквадратичную ошибку, при этом допуская отдельные большие ошибки, то чебышевское приближение уменьшает экстремальную наибольшую ошибку.

Таким образом, можно определить базовые принципы работы кругломера, основанные на применении функции Гаусса для вычисления преобразования, применяемого

133		Theoretically exact dimension (TED) ISO 1101
134		Minimax (chebyshev) feature ISO 1101
135		Least squares (Gaussian) feature ISO 1101
136		Minimum circumscribed feature ISO 1101

Рис. 6. Выгрузка из стандарта ИСО. Требование Чебышева и Гаусса

к каждой точке с обмеренного датчиком сечения. Формула функции Гаусса имеет вид [6]:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}. \quad (7)$$

В двух измерениях это произведение двух функций Гаусса, по одной для каждого измерения:

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (8)$$

где x, y – координаты точки;

σ – среднеквадратическое отклонение нормального распределения.

При использовании в двух измерениях эта формула формирует поверхность, контуры которой представляют собой концентрические окружности, как это показано на круглограммах нормальным распределением относительно центральной точки [6].

Таким образом, можно сделать вывод по принципу работы кругломера – алгоритм основан на применении фильтров Гаусса, при особых требованиях стандарта ИСО – на требованиях фильтрации по Чебышеву, при этом применяется расчет по СКО. Применение метода вписанных окружностей предполагает расчет круглости в зависимости от количества снимаемых сечений, круглость пересчитывается в отклонение от заданного биения, концентричности и других характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гущина Е. А., Епифанцев К. В., Ефремов Н. Ю.** Цифровая метрология: учеб.-метод. пособие. СПб: ГУАП, 2022. 104 с.
2. **Фролова Е. А., Ефремов Н. Ю., Епифанцев К. В.** Проблемы калибровки кругломера «Roundtest RA-120P» при подготовке к работе // Сб. тезисов докладов I молодежной конференции «За нами будущее». ФГУП «ВНИИМ», 2022. С. 219–221.
3. **Захаров О. В., Пугин К. Г.** Выбор опорных окружностей при анализе круглости деталей подшипников качения // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 14–21.
4. ISO 7083. Technical product documentation. Symbols used in technical product documentation. Proportions and dimensions. 2022
5. Электронный ресурс https://studopedia.ru/2_111314_minimaksnyy-kriteriy-ili-kriteriy-chebisheva.html. Дата обращения 18.11.2022
6. Электронный ресурс https://ru.wikipedia.org/wiki/Размытие_по_Гауссу Дата обращения 16.11.2022
7. Электронный ресурс <https://ru.wikipedia.org/wiki/Кардиоида> Дата обращения 18.11.2022