

## НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

---

УДК 621.9:531.7

**Б.М. Бржозовский, О.В. Захаров**

### **ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕСЦЕНТРОВОГО ИЗМЕРЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ КРУГЛОСТИ ДЕТАЛЕЙ**

*Представлено информационное обеспечение процесса бесцентрового измерения отклонения от круглости деталей на основе новой математической модели. Дана оценка эффективности метода бесцентрового измерения на основе численного эксперимента.*

Бесцентровое измерение, отклонение от круглости.

**B.M. Brzhozovsky, O.V. Zakharov**

### **A INFORMATION SUPPORT OF CENTERLESS MEASUREMENTS OF ROUNDNESS ACCURACY DEVIATION OF DETAILS**

*A nformation support of centerless measurements of roundness accuracy deviation of details based on the new mathematical model is presented. The estimation of efficiency method of centerless measurements using numerical simulation experiments is given.*

Centerless measurements, roundness accuracy deviation.

Более двух третей деталей машин и приборов представляют собой тела вращения, от точности размеров и формы которых решающим образом зависит качество машины в целом. Поэтому в технике большое внимание уделяют вопросам контроля поверхностей этих деталей, что определило множество методов измерения, каждый из которых не может быть универсальным и имеет свою рациональную область применения.

Для нормирования формы цилиндрических деталей ГОСТ 24642-81 предусматривает комплексные показатели: отклонения от цилиндричности, круглости и профиля продольного сечения. На практике контроль точности формы таких деталей сводится к измерению в нескольких сечениях отклонения от круглости, показывающего, насколько проверяемый профиль отличается от некоторой базовой окружности. Стандарты различных стран рекомендуют в качестве базы среднюю окружность, прилегающую окружность или зону минимальной ширины. В большинстве случаев за базовую окружность принимают среднюю окружность профиля. В ряде случаев также оценивают частные виды отклонений формы в поперечном сечении – овальность и огранку.

В настоящее время известны методы радиусного, координатного и разностного измерения отклонения от круглости [1]. Каждый из указанных методов имеет свои особенности и

предполагает использование различных измерительных приборов и алгоритмов обработки результатов. При разностном методе измеряют не абсолютные значения интересующей функции, а разности между ее последовательными значениями, разделенными определенным промежутком. Причем аналитическая зависимость между измеряемой и искомой величиной неизвестна. Для измерения отклонения от круглости в цеховых условиях в основном применяют приборы с двухточечным контактом (микрометры и измерительные скобы) и трехточечным контактом (разнообразные комбинации призм и датчиков малых линейных перемещений).

Приборы с двухточечным контактом, например, Roll Cal фирмы Rool Test (Финляндия) измеряют только диаметры. Профиль, имеющий огранку с нечетным числом граней, имеет равные диаметры во всех направлениях, и следовательно двухточечный прибор отклонения от круглости не обнаружит. В общем случае профиль детали описывается суперпозицией большого числа гармоник, поэтому прибор типа Roll Cal обладает большой погрешностью, устранить которую конструктивно или расчетным путем нельзя.

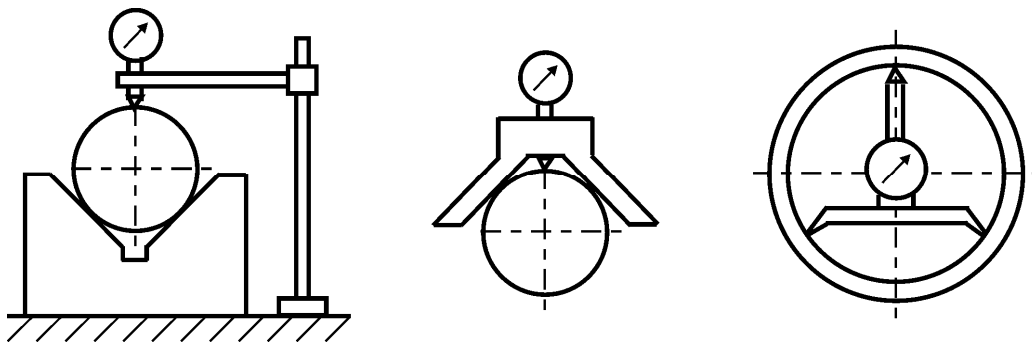


Рис. 1. Приборы для бесцентрового измерения отклонения от круглости

Бесцентровое измерение поперечного профиля деталей конструктивно реализовано в виде следующих приборов (рис. 1): призма с нерегулируемым положением датчика (а), призматический «наездник» (б), прибор с мостиками-призмами для контроля внутренних поверхностей (в). Накладные седлообразные приборы типа «наездник» применяют для контроля труднодоступных профилей крупногабаритных деталей, например, входных кромок турбинных лопаток [2]. Наиболее распространены приборы с углом призмы 60, 90 или 120°, у которых направление измерения совпадает с биссектрисой угла призмы. Известны также призмы с регулируемым углом раскрытия и изменяемым положением датчика. Данные приборы конструктивно просты, надежны в применении, но погрешность измерения отклонения от круглости по различным данным [1-3] достигает 100 %.

Основная особенность бесцентрового измерения состоит в том, что показания прибора  $\Delta_n$  связаны со значением фактического отклонения от круглости  $\Delta$  уравнением  $\Delta_n = \mu \Delta$ , где  $\mu = f(\alpha, \beta, n)$  – коэффициент воспроизведения;  $\alpha$  – угол призмы;  $\beta$  – угол, определяющий положение датчика;  $n$  – номер гармоники. В процессе измерения деталь базируется по граням призмы непосредственно измеряемой поверхностью. Поэтому погрешность установки приводит к изменению положения центра профиля детали и соответственно расстояния до измерительного датчика. Эти изменения прибор воспринимает так же, как и отклонения формы поверхности. Конкретный прибор с фиксированными значениями углов  $\alpha$  и  $\beta$  имеет различные коэффициенты воспроизведения для разных гармонических составляющих профиля детали. Поскольку профиль детали описывается суперпозицией гармоник с различными амплитудами и начальными фазами, то установление коэффициента  $\mu$  – сложная математическая задача.

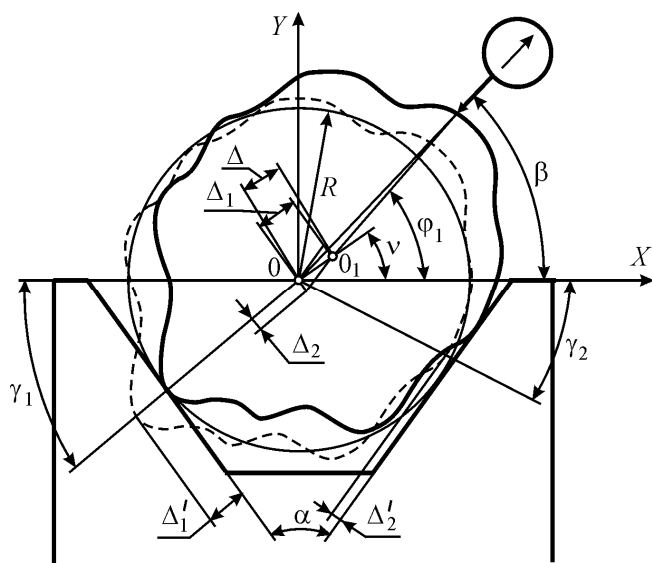


Рис. 2. Расчетная схема бесцентрового измерения

Известная математическая модель бесцентрового измерения, описанная в работе [1], предполагает неизменность точек контакта детали с гранями призмы в процессе контроля. При этом полученные зависимости справедливы только для отдельных гармоник, т.е. не учитываются их начальные фазы, что нарушает принцип суперпозиции. Отсутствие строгой модели и визуализации результатов расчета затруднило оценку погрешности данной модели. Более корректная модель бесцентрового измерения отклонения от круглости, ориентированная на использование численных методов анализа и компьютерную поддержку, предложена в работе [4].

Математическое описание процесса измерения рассматривается в три этапа: нахождение центра средней окружности профиля детали после установки (для каждого текущего положения), определение радиусов измеренных датчиком точек профиля, расчёт отклонения от круглости по измеренным точкам.

Поперечный профиль детали в полярной системе координат описан тригонометрическим полиномом вида [5, 6]:

$$r = R + \sum_{n=2}^p a_n \cos(n\varphi - \varphi_n), \quad (1)$$

где  $R$  – радиус средней окружности;  $a_n, \varphi_n$  – амплитуда и начальная фаза  $n$ -й гармоники;  $p$  – наибольшее число гармоник;  $\varphi$  – полярный угол.

На первом этапе определяем погрешность установки, которая представляет собой отклонение фактически достигнутого положения детали от положения номинально цилиндрической детали радиуса  $R$  (без отклонений формы). При этом в поперечном сечении детали требуемое положение её центра (точка  $O$ ) определено радиусом  $R$  и углом призмы  $\alpha$  (рис. 2).

Уравнение прямолинейной грани призмы в полярной системе координат:

$$r_2 = R / \cos(\lambda - \varphi), \quad (2)$$

где  $\lambda$  – угол, задающий перпендикуляр к грани (для левой грани  $\lambda_1 = 180^\circ + \alpha/2$ ; для правой грани  $\lambda_2 = 360^\circ - \alpha/2$ ).

Точками контакта детали с гранями призмы будут точки на профиле, которые наиболее близко расположены к плоскостям призмы. Установим зазор  $\Delta'$  и полярный угол  $\varphi$  между гранью и деталью в исходном положении:

$$\Delta' = \{r - r_2\} \rightarrow \max. \quad (3)$$

Считаем, что деталь одновременно и постоянно находится в точечном контакте с обеими гранями призмы. Поэтому при отклонении формы в точках контакта деталь смещается по направлениям углов  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ , а фактическое смещение происходит вдоль граней призмы. Таким образом, деталь последовательно перемещается по граням призмы на величины  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ , которые представляют собой проекции  $\Delta'_1$  и  $\Delta'_2$ :

$$\begin{cases} \Delta_1 = \Delta'_1[\sin(\gamma_1 + \alpha/2) + \cos(\gamma_1 + \alpha/2)\operatorname{ctg}\alpha]; \\ \Delta_2 = \Delta'_2[\sin(\gamma_1 + \alpha/2) + \cos(\gamma_1 + \alpha/2)\operatorname{ctg}\alpha]. \end{cases} \quad (4)$$

Положение центра  $O_1$  детали после установки находится векторным сложением смещений  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ :

$$\begin{cases} \Delta = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 - 2\Delta_1\Delta_2 \cos\alpha}; \\ \nu = \operatorname{arctg}\left[(\Delta_1 + \Delta_2) \operatorname{tg}\alpha / 2(\Delta_1 - \Delta_2)\right]. \end{cases} \quad (5)$$

На втором этапе определяем радиус  $r_1$  измеренных точек профиля детали после базирования. Исходными данными являются координаты  $(\Delta, \nu)$  центра средней окружности профиля и радиусы  $r$  точек профиля детали. Для определения зависимости между радиус-векторами  $r_1$  и  $r$  целесообразно воспользоваться численным методом. Так как измерительный датчик может перемещаться только вдоль прямой, заданной углом  $\beta$ , то он регистрирует точку, наиболее близко расположенную к данной прямой. Поэтому задача сводится к поиску точки профиля, имеющей кратчайшее расстояние  $d$  до прямой перемещения датчика:

$$d = |y_i - x_i \operatorname{tg}\beta| / \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\beta} \rightarrow \min, \quad (6)$$

где  $x_i, y_i$  – декартовы координаты  $i$ -й точки профиля детали.

В результате расчётов по формулам (1)-(6) получаем измеренный профиль в декартовой системе координат. Преобразуя координаты из декартовой в полярную систему, находим искомую круглограмму.

На третьем этапе определяют отклонение от круглости – максимальное расстояние от точек профиля до средней окружности. Если центр средней окружности круглограммы совпадает с началом системы координат, то отклонение от круглости – это разность максимального и минимального радиусов. В противном случае требуется дополнительно определить координаты центра средней окружности, а затем – отклонение от круглости.

Изложенная методика моделирования бесцентрового измерения отклонения от круглости реализована в виде программы на языке C++ (рис. 3).

Проведено сравнение результатов расчета по разработанной математической модели с данными работы [1] для первых 12 гармоник прибором с параметрами  $\alpha = 90^\circ$  и  $\beta = 7,5^\circ$ . Анализ показал, что расхождение результатов в среднем составляет 5 %. Погрешность модели [1] объясняется допущением, что точки контакта всегда находятся на перпендикулярах к соответствующим граням призмы, проведенных через центр средней окружности профиля в исходном положении. Такая постановка задачи позволила получить формулы для коэффициента воспроизведения в явном виде, но без учета влияния радиуса средней окружности измеряемой детали. В общем случае точки контакта не удовлетворяют указанному условию, а величина смещения центра средней окружности нелинейно зависит от амплитуды гармоники.

По результатам проведенных численных экспериментов установлено, что при использовании одной призмы с постоянными углом раскрытия и угловым положением датчика нельзя обеспечить коэффициент воспроизведения для отдельных гармоник не только близкий к единице, но и примерно постоянный для первых 20-и гармоник. Принцип суперпозиций при моделировании бесцентрового измерения не соблюдается, поэтому рекомендации по настройке прибора для отдельных гармоник не позволяют эффективно минимизировать погрешность измерения в реальных производственных условиях.

Для контроля партии колец подшипников  $\varnothing 30$  на ОАО «Саратовский подшипниковый завод» проведен поиск оптимальной наладки прибора для бесцентрового измерения на основе метода статистического моделирования Монте-Карло и получены оценки относительной погрешности измерения. Исходными данными служили результаты предварительного измерения на кругломере *Talyrond 73*. В частности, установлено, что амплитуды гармоник распределены по закону Пирсона первого типа, а начальные фазы – по закону равных веро-

ятностей, между некоторыми гармониками имеются значимые корреляционные связи. Для статистического моделирования использована методика, изложенная в работах [6, 7]. Результаты статистической обработки данных моделирования при измерении партии из 200 заготовок на призме с углом  $\beta = 60, 90^\circ$  при трех положениях датчика  $\alpha = 0, 15, 45^\circ$  представлены на рис. 4. Исследования показали, что относительная погрешность измерения описывается нормальным или логнормальным законами с двумя параметрами – математическим ожиданием  $m$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma$ . Логнормальный закон получается при учете корреляции между амплитудами отдельных гармоник.

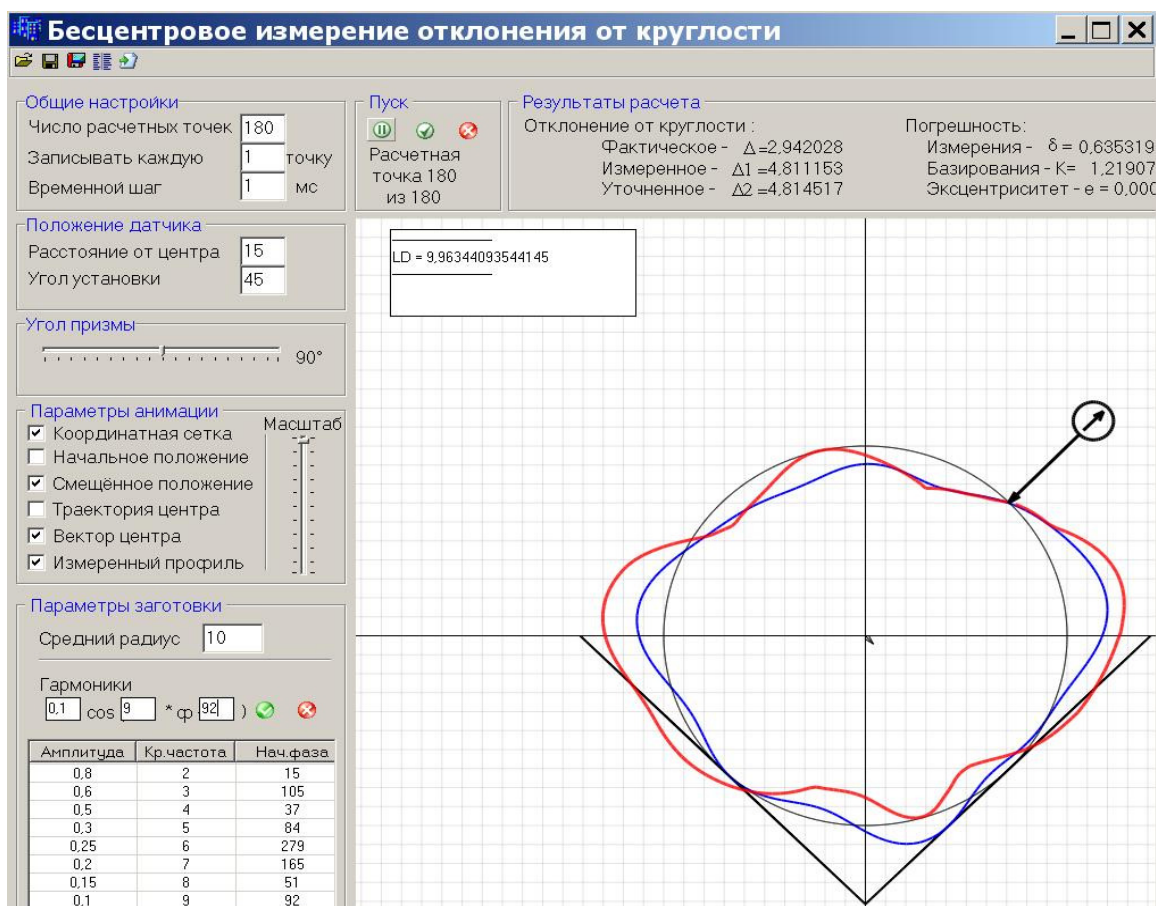


Рис. 3. Моделирование бесцентрового измерения

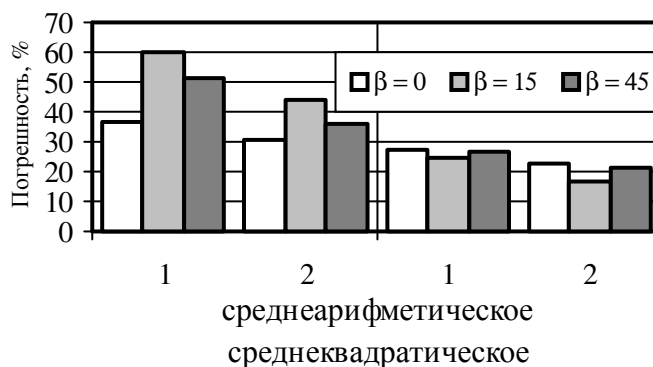


Рис. 4. Погрешность измерения отклонения от круглости: 1 –  $\alpha = 60^\circ$ ; 2 –  $\alpha = 90^\circ$

Анализ рис. 4 показал, что минимальная погрешность измерения соответствует углу призмы  $\alpha = 90^\circ$  и нулевому положению датчика. Среднеарифметическое относительной погрешности составило  $m = 30,9 \%$ , а среднеквадратическое отклонение  $\sigma = 22,6 \%$ . По сравнению с вариантом  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\beta = 15^\circ$  удастся примерно в два раза уменьшить среднеарифметическое относительной погрешности измерения, хотя при этом среднеквадратическое отклонение не будет минимальным.

Таким образом, проведённые исследования позволяют сделать вывод, что бесцентровое измерение эффективно использовать при контроле больших партий деталей в цеховых условиях при массовом производстве (например, в автомобильной и подшипниковой промышленности). Предварительный анализ законов и параметров распределения гармонического состава погрешностей формы на основе эталонного измерения на прецизионном кругломере и статистическое моделирование по представленной в статье методике позволяют оценить погрешность измерения. В результате возможна оптимальная наладка прибора, которая позволяет существенно уменьшить методическую погрешность измерения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Авдулов А.Н. Контроль и оценка круглости деталей машин / А.Н. Авдулов. М.: Изд-во стандартов, 1974. 176 с.
2. Палей М. А. О возможностях седлообразных приборов при контроле диаметров и отклонений формы / М.А. Палей, В.А. Чудов // Измерительная техника. 1972. № 4. С. 20-21.
3. Гебель И.Д. Бесцентровое измерение формы профиля тел вращения / И. Д. Гебель // Измерительная техника. 1973. № 3. С. 24-27.
4. Бржозовский Б. М. Бесцентровое измерение отклонения от круглости высокоточных деталей / Б. М. Бржозовский, О.В. Захаров, В.В. Горшков, М. Э. Автономов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. № 3. Вып. 2. С. 42-45.
5. Захаров О.В. Методические основы гармонического анализа круглограмм / О.В. Захаров, В.В. Погораздов, А.В. Кочетков // Метрология. 2004. № 6. С. 3-10.
6. Захаров О.В. Измерение отклонения от круглости с использованием гармонического анализа / О.В. Захаров, Б.М. Бржозовский // Контроль. Диагностика. 2006. № 1. С. 49-51.
7. Лабутин С.А. Суммирование случайных погрешностей измерений и анализ погрешностей косвенных измерений методом Монте-Карло / С.А. Лабутин, М.В. Пугин // Измерительная техника. 2000. № 11. С. 6-9.
8. Захаров О.В. О точности центрирования при измерении на кругломерах / О.В. Захаров, Б.М. Бржозовский // Измерительная техника. 2006. № 11. С. 20-22.

#### **Бржозовский Борис Максович –**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А.

#### **Захаров Олег Владимирович –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А.

*Статья поступила в редакцию 20.07.11, принята к опубликованию 17.11.11*