

4. Bich W., Cox M., Michotte C. Towards a new GUM – an update // Metrologia 2016. No. 53. P. S149–S159.
5. Бурмистрова Н. А., Степанов А. В., Чуновкина А. Г. Вычисление расширенной неопределенности измерения в случае двух источников неопределенности // Метрология и приборостроение. 2016. № 3. С. 18–22.
6. РМГ 43–2001. Метрология. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерения».
7. ГОСТ Р 8.736–2011. ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений.

Основные положения.

8. Захаров И. П. Исследование и повышение достоверности интервальных оценок точности прямых многократных измерений // АСУ и приборы автоматики. 2005. Вып. 132. С. 106–109.
9. Захаров И. П. Применение метода Монте-Карло для оценивания неопределенности в измерениях // Стандартизация, метрология, сертификация (Болгария). 2006. № 12. С. 2–6.

Дата принятия: 07.02.2018.

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

531.717

Итерационный метод коррекции радиуса сферического щупа мобильных координатно-измерительных машин при контроле поверхностей вращения

Ф. В. ГРЕЧНИКОВ¹, А. Ф. РЕЗЧИКОВ², О. В. ЗАХАРОВ³

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева, Самара, Россия

²Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов, Россия

³Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, Саратов, Россия, e-mail: zov20@mail.ru

Рассмотрен итерационный метод компенсации радиуса щупа мобильных координатно-измерительных машин при контроле тел вращения. Новый метод минимизирует угол между нормальными в заданной точке к номинальному и реальному профилям в результате последовательных приближений. Результаты измерения и обработки данных показали высокую эффективность итерационного метода по сравнению с известными методами, базирующимися на методе наименьших квадратов. Наибольший эффект по уменьшению погрешности компенсации радиуса щупа достигается при небольшом числе измеренных точек и их неравномерном расположении на поверхности детали.

Ключевые слова: мобильная координатно-измерительная машина, поверхность вращения, компенсация радиуса щупа.

An iterative method of probe radius compensation for the body of revolution control on mobile coordinate measuring machines is considered. The new method minimizes the angle between the normals at the given point to the nominal and real profiles by successive approximations. Results of measurement and data processing demonstrated high efficiency of the iterative method in comparison with the known ones based on the least squares method. The greatest effect is achieved with a small number of measured points and their uneven location on the surface of the part.

Key words: mobile coordinate measuring machine, rotation surface, probe radius compensation.

Современные координатно-измерительные машины (КИМ) позволяют не только быстро и точно измерять детали, но и, используя возможности электронно-вычислительной машины, выявлять отклонения заданной формы, статистически обрабатывать данные измерений, вычислять наладочные параметры для корректировки процесса обработки [1–6]. Вместе с тем, множество задач контроля геометрических характеристик сложных поверхностей решаются недостаточно эффективно. Это обусловлено слабой разработанностью математических моделей для компенсации радиуса сфе-

рического наконечника щупа и исключения погрешностей расположения базовых поверхностей детали. Данное обстоятельство приобретает особое значение при измерении на мобильных КИМ, где трудно достижимы: равномерное расположение точек на контролируемой поверхности; подвод наконечника щупа по нормали к номинальной поверхности.

Одной из первостепенных задач контроля тел вращения будет построение поверхности (профиля) детали по измеренным координатам центра сферического наконечника щупа КИМ. Для элементарных поверхностей обычно осу-

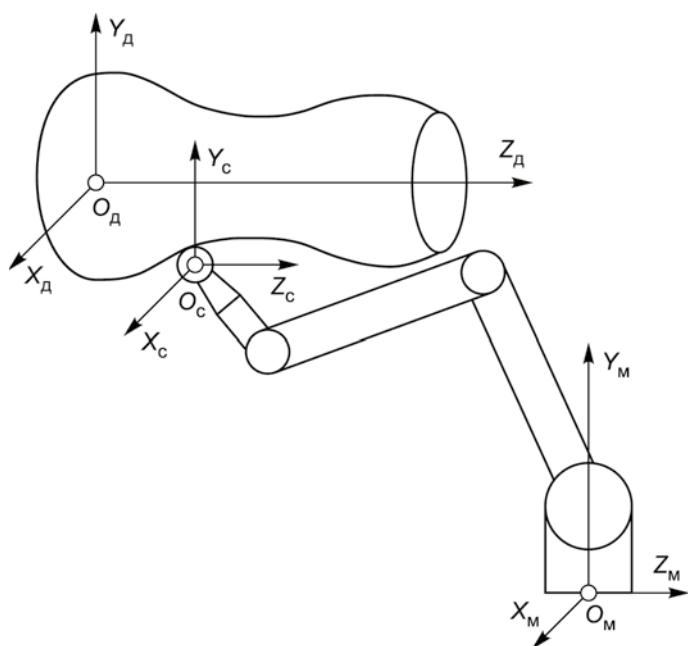


Рис. 1. Системы координат при контроле тел вращения

существляется простая компенсация радиуса сферического щупа относительно номинальной поверхности. При этом плоскость отображается в плоскость, а у сферы и цилиндра изменяются только значения радиусов. Такой подход реализован в большинстве современных программных продуктов, например PowerInspect (Deltcam, Великобритания), Geomagic (Geomagic, США). Для сложных поверхностей используют функцию получения эквидистантных точек профиля. Когда при измерении имеется достаточное число координат точек (порядка нескольких тысяч), то можно выполнить аппроксимацию поверхности, найти нормали к ней и ввести поправку на радиус щупа [7]. Несмотря на то, что такой подход не является математически строгим, он позволяет с достаточной для практики точностью построить реальную поверхность по результатам измерений. Практическое применение получили и более сложные алгоритмы компенсации радиуса сферического щупа, например модифицированный итеративный алгоритм ближайших точек [8].

Принципиально иная ситуация возникает, если для контроля применяется мобильная КИМ. Тогда сбор информации осуществляется путём одиночных касаний оператором, и в результате имеется всего несколько десятков точек. В таком случае использование описанного выше подхода приводит к существенному упрощению математической модели и значительным погрешностям измерений. В связи с этим авторами предложен новый итерационный метод расчёта погрешности измерений геометрического профиля, позволяющий отказаться от нахождения нормалей с использованием соседних точек, но при этом достаточно точно отражающий геометрию реального профиля.

Рассмотрим задачу контроля тела вращения со сложным профилем осевого сечения. Считаем, что теоретическая (номинальная) форма профиля осевого сечения известна и

определяется зависимостью радиуса r_i конкретной i -й точки профиля от координаты z_i положения поперечного сечения вдоль оси детали. Тогда известны и нормали n_i в любой точке профиля детали, который определяется системой векторных уравнений вида

$$\begin{cases} \mathbf{r}(z) = r_i \mathbf{i} + z_i \mathbf{j}; \\ \mathbf{n} = \frac{\partial \mathbf{r}(z)}{\partial z} = n_r \mathbf{i} + n_z \mathbf{j}. \end{cases} \quad (1)$$

Традиционная последовательность контроля геометрических характеристик детали может быть сведена к следующему. Координатно-измерительная машина должна обеспечивать подвод измеряющего элемента (сферического наконечника щупа) по нормали к детали в желаемой точке до касания и фиксировать положение (координаты) центра сферического наконечника в этот момент. Предположим, что в процессе измерения было зафиксировано m касаний щупа и детали в локальной системе координат (X_C, O_C, Y_C, Z_C) , связанной со сферическим наконечником (рис. 1). Тогда результаты измерения также известны в системе координат (X_D, O_D, Y_D, Z_D) , связанной с деталью, поскольку для любой современной КИМ пересчёт из систем координат измерительной машины (X_M, O_M, Y_M, Z_M) и (X_C, O_C, Y_C, Z_C) в систему координат детали производится автоматически. Положение системы (X_D, O_D, Y_D, Z_D) устанавливается математически после измерения базовых поверхностей детали (виртуальное базирование).

В момент касания КИМ фиксирует координаты центра сферического наконечника щупа (в дальнейшем – сферы). Таким образом, по окончании измерений будет получено m координат центра сферы в системе координат (X_D, O_D, Y_D, Z_D) . Однако при этом останется неизвестным, координаты какой точки сферы стала точкой контакта с измеряемой деталью в каждом положении. Поэтому необходимо рассчитать координаты точки касания детали и сферы, исходя из имеющихся координат центра сферы и нормалей к теоретической поверхности. Форма наконечника щупа в момент касания с деталью в любом осевом сечении вала представляет окружность. Нормали к поверхностям контролируемой детали и щупа в точке касания лежат на одной прямой, одновременно пересекающей ось тела вращения и центр сферы. Таким образом, точка касания и нормали к поверхностям детали и сферического наконечника щупа в этой точке в одной плоскости – осевом сечении тела вращения, а, следовательно, деталь и щуп в момент касания можно рассматривать в едином сечении.

Оценка погрешности формы и профиля выполняется путём сопоставления номинальной поверхности и измеренных точек. Для того чтобы вычислить погрешность профиля в некоторой точке номинального профиля необходимо выяснить насколько отстоит от неё измеренная точка в направлении нормали, т. е. необходимо из массива центров окружностей, касающихся реального профиля (эквидистантных точек), получить набор точек касания. Затем вычислить расстояние между точками касания и номинальным профилем в направлении нормали к этому профилю.

Условие касания шупа и детали представляет систему векторных уравнений

$$\begin{cases} \mathbf{r}_c = \mathbf{r}_d; \\ \mathbf{n}_c = \mathbf{n}_d, \end{cases}$$

где $\mathbf{r}_c, \mathbf{r}_d$ – радиус-векторы точек шупа и профиля; $\mathbf{n}_c, \mathbf{n}_d$ – нормали в соответствующих точках.

Таким образом, в точке касания шупа и реального профиля нормали к ним должны совпадать. В свою очередь, нормаль к окружности шупа всегда проходит через её центр. Поэтому, если бы удалось узнать нормаль в точке касания, то, проведя прямую, параллельную нормали и проходящую через центр окружности шупа, точка касания получилась бы как одна из двух точек пересечения этой прямой и окружности. Но на практике невозможно точно узнать, в какой именно точке на окружности измерительного элемента произошло касание. Известны лишь координаты центра сферы шупа. Поэтому для определения координат реального профиля целесообразно использовать следующий итерационный метод.

За точку касания выбирают точку пересечения окружности шупа и нормали к номинальному профилю, которая проходит через центр шупа (рис. 2, а). Для нахождения точки на окружности шупа, удовлетворяющей указанному условию с заданной погрешностью, последовательно находят точки пересечения нормалей к профилю (рис. 2, б). Условием завершения поиска будет совпадение нормалей на двух последовательных итерациях с некоторой заранее заданной погрешностью. Таким образом, итерационный метод последовательно минимизирует угол между нормальями к номинальной и реальной поверхностям в заданной точке профиля.

Последовательность расчёта по итерационному алгоритму следующая.

1. На первом шаге в точке заданного профиля в осевом сечении $Z_c O_c$ (рис. 2, б точка А) находим нормаль:

$$\mathbf{n}_1 = \frac{\partial \mathbf{r}(z)}{\partial z} \Big|_{z=z_1} = n(r_1, z_1) = n_{r_1} i + n_{z_1} j.$$

В качестве точки А целесообразно выбрать точку номинального профиля, наиболее близко расположенную к центру сферы, т. е. для которой выполняется условие: $\{|\mathbf{r}_{d1} - \mathbf{r}_{oc}|\} \rightarrow \min$.

2. Находим точку пересечения номинального профиля (первое уравнение в (1)) и прямой, проходящей параллельно $\mathbf{n}_1$ через центр окружности шупа (второе уравнение в (2)). Для чего решаем систему уравнений

$$\begin{cases} r = r(z); \\ r = r_0 + [(z - z_0)n_{r_1}/n_{z_1}], \end{cases} \quad (2)$$

где r_0 – проекция радиус-вектора точки на ось Oz .

Решение системы уравнений (2) позволяет найти следующую точку А с координатами (r_2, z_2) .

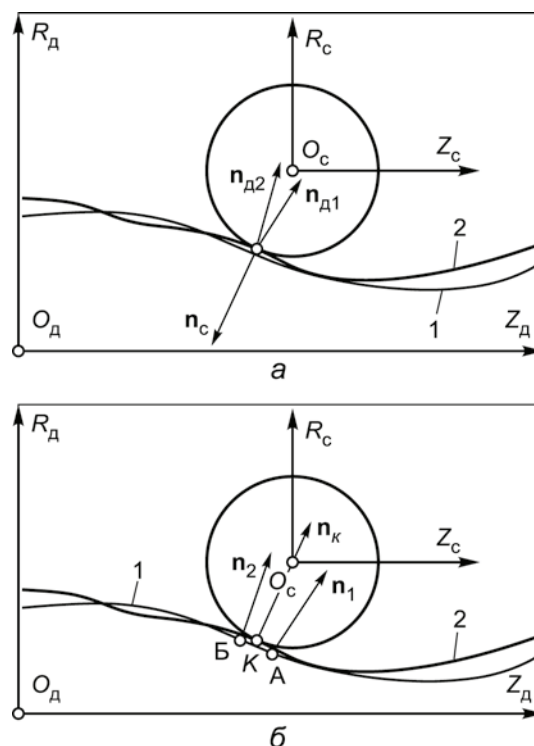


Рис. 2. Контроль формы заданного профиля детали (а) и определение координат точки контакта детали и шупа (б): 1 – номинальный профиль; 2 – реальный профиль

3. Далее по аналогии с п.1 в точке А строим нормаль к заданному профилю:

$$\mathbf{n}_2 = \frac{\partial \mathbf{r}(z)}{\partial z} \Big|_{z=z_2} = n(r_2, z_2) = n_{r_2} i + n_{z_2} j.$$

4. Находим точку пересечения заданного профиля и прямой, проходящей параллельно $\mathbf{n}_2$ через центр окружности (см. рис. 2, б). Для этого решаем систему уравнений:

$$\begin{cases} r = r(z); \\ r = r_0 + [(z - z_0)n_{r_2}/n_{z_2}]. \end{cases}$$

5. Условием окончания итераций в k -й точке считаем выполнение неравенства

$$|n_k^{-1} - n_{k-1}^{-1}| R < \epsilon, \quad (3)$$

где R – радиус сферы шупа; ϵ – погрешность определения точки контакта; n_k^{-1} – нормированная касательная в k -й точке.

Условие окончания поиска можно сформулировать как минимизацию угла расхождения между нормальями к реальному и номинальному профилям на двух последовательных итерациях с заданной погрешностью. Однако для возможности количественной оценки погрешности указанное значение дополнительно умножается на радиус сферического шупа. Левая часть выражения (3) представляет собой модуль раз-

ности векторов точек касания со сферой на двух последних итерациях, т. е. максимальную абсолютную погрешность при определении координат точки касания щупа с деталью. Поэтому в качестве заданного значения погрешности ϵ целесообразно принимать значение, меньшее или равное инструментальной погрешности измерения или погрешности калибровки щупа.

Рассмотренный итерационный метод будет сходиться, если заданный профиль в окрестности точки касания будет иметь меньшую кривизну, чем окружность щупа. На практике данное условие должно всегда выполняться за счёт правильного выбора измерительного щупа. На точность метода не оказывает влияние неравномерность расположения измеренных точек на поверхности, что крайне важно для метода наименьших квадратов.

Предлагаемый метод компенсации радиуса сферического щупа успешно апробирован на мобильной КИМ типа Faro Arm Edge (FARO Swiss Holding GmbH, Швейцария) при контроле профиля заданного сечения вала суперфинишного станка. Вал представляет однополостный гиперболоид длиной 800 мм, минимальным диаметром 125 мм и максимальным диаметром 138 мм. Измерение проводилось для трёх вариантов контроля по 30, 60 и 120 точкам. Использовались соответственно 3, 5 и 8 сечений по оси вала и 10, 12 и 15 контрольных точек в каждом поперечном сечении. Базирующими поверхностями выступали цилиндрическая шейка под подшипник и торец вала. В процессе измерения вал не переустанавливался, но после каждого измерения проводилась процедура перебазирования. Калибровка сферического щупа выполнялась один раз и погрешность составила 0,025 мм. Программное обеспечение КИМ позволило сохранить результаты измерения в виде координат центра сферического щупа. Обработка данных проводилась: по стандартному алгоритму в программе Power Inspect; по алгоритму с компенсацией ближайших точек по методу наименьших квадратов; по авторскому итерационному методу. Для расчётов по двум последним методам использовалась оригинальная программа, разработанная в программно-расчётной среде Matlab. Компьютерное время обработки данных для метода наименьших квадратов и разработанного итерационного метода приблизительно одинаково. Результаты измерения для трёх указанных методов представлены в таблице.

Анализ данных таблицы показал, что с увеличением числа контролируемых точек на поверхности вала измеренная погрешность формы возрастает. Более сложные методы нахождения точек контакта щупа и детали обеспечивают уменьшение

расчётного значения погрешности формы заданного профиля. При этом эффективность методов, оцениваемая мерой уменьшения расчётной погрешности формы профиля, возрастает при уменьшении числа измеряемых точек. Метод ближайших точек обеспечивает улучшение результата на 9 % для 120 точек и на 12 % для 30 точек. Авторский итерационный метод уменьшает погрешность на 15 % для 120 точек и на 31 % для 30 точек.

Таким образом, итерационный метод нахождения точек касания щупа и детали позволяет с заранее заданной точностью построить реальный профиль и найти его отклонения от номинального в условиях ограниченного числа измеренных точек. При необходимости отклонения профиля тела вращения могут быть пересчитаны в радиусы и определено нахождение в допуске на соответствующие радиальные размеры, а также выполнен расчёт соосности относительно базовых поверхностей на детали.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10204).

Л и т е р а т у р а

1. Пекарш А. И., Феоктистов С. И., Колыхалов Д. Г., Шпорт В. И. Координатно-измерительные машины и комплексы // CALS-технологии. 2011. № 3. С. 36–48.
2. Бражкин Б. С., Исаев Н. И., Кудинов А. А., Миротворский В. С. Координатно-измерительные машины для контроля тел вращения. М.: Миттель Пресс, 2012.
3. Сысоев Ю. С. Координатные методы контроля геометрии поверхностей изделий машиностроения. Пространственные методы контроля поверхностей деталей машин // Справочник. Инженерный журнал. 2007. № 5. С. 16–22.
4. Бражкин Б. С., Миротворский В. С. Расчёт координат криволинейных поверхностей на координатно-измерительных машинах // Измерительная техника. 2005. № 7. С. 21–24.
5. Гришанов В. Н., Ойнонен А. А. Современные лазерные измерительные системы в производственном цикле космической техники // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. № 1 (32). С. 24–35.
6. Гречников Ф. В., Захаров О. В., Королев А. А. Направления повышения производительности и точности контроля сложных поверхностей на координатно-измерительных машинах // XVI международная конференция. Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта. М.: ИПУ РАН, 2016.
7. Печенкин В. А., Рузанов Н. В., Болотов М. А. Моделирование координатных измерений геометрических параметров формы и расположения сложных профилей лопаток компрессора ГТД // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6–4. С. 921–928.
8. Печенкин В. А., Болотов М. А., Рузанов Н. В., Янюкина М. В. Оптимизация измерений геометрии деталей со сложными поверхностями // Измерительная техника. 2015. № 3. С. 18–23.

Дата принятия: 14.11.2017.

Погрешность формы, мм, заданного сечения вала суперфинишного станка

Метод компенсации радиуса сферического щупа	Число измеренных точек		
	30	60	120
Стандартный	0,323	0,341	0,352
Ближайших точек	0,283	0,315	0,322
Разработанный итерационный	0,224	0,267	0,298