

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-3695.2011.3, Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 16.552.11.7038) с применением оборудования центров коллективного пользования ИК РАН, НИЦПВ, МФТИ, «Курчатовского центра синхротронного излучения и нанотехнологий» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы».

### Л и т е р а т у р а

1. Sun D. e. a. Purification and stabilization of colloidal ZnO nanoparticles in methanol // J. Sol-Gel. Sci. Technol. 2007. V. 43. P. 237—243.
2. Небукина Е. Г., Аршакуни А. А., Губин С. П. Наночастицы оксида цинка в матрице этиленпропиленового каучука // Ж. неорганической химии. 2009. Т. 54. № 11. С. 1763—1766.

3. ГОСТ 8.736—2013. ГСИ. Прямые измерения с много-кратными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.

4. Sulyanov S. N., Popov A. N., Kheiker D. M. Using a two-dimensional detector for X-ray powder diffractometry // J. Appl. Crystallorg. 1994. V. 27. P. 934—942.

5. Sulyanov S. e. a. 2θ-scanning 2D-area detector for high quality powder data collection using synchrotron radiation // Z. Kristallogr. Proc. 2011. V. 1. P. 175—180.

6. Хейкер Д. М. и др. Станция белковой кристаллографии на пучке СИ из поворотного магнита накопителя «Сибирь-2» // Кристаллография. 2007. № 2. Р. 374—380.

7. Boultif A., Louer D. Powder pattern indexing with the dichotomy method. // J. Appl. Cryst. 2004. V. 37. P. 724—731.

Дата принятия 18.07.2012 г.

## ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

006.9

## Виртуальные опорные значения для калибровки средств измерений топографии пространственных поверхностей

В. Л. СКРИПКА, М. В. ЗЕЛЕНКОВА

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,  
Москва, Россия, e-mail: viz\_zelen@rambler.ru

Рассмотрена методика формирования опорных значений предназначенных для калибровки средств измерений геометрических параметров пространственных поверхностей. Она основана на создании виртуальной модели сложной поверхности реального контрольного образца посредством его цифровой идентификации с применением аппарата клеточных автоматов. Приведены и проанализированы результаты контрольно-проверочных измерений рабочих поверхностей зубчатых колес, которые подтверждают возможность и целесообразность применения данной методики на практике.

**Ключевые слова:** калибровка, принятное опорное значение, виртуальная модель, сложнопрофильные поверхности.

The method of formation of reference values for calibration of instruments for spatial surfaces geometric parameters measurement is considered. The method based on creation of virtual model of complex surface of real control sample through its digital identification with application of automatic checking machine mathematical tool. The results of control verification measurements of gears working surfaces confirming the possibility and suitability of this method practical application is presented and analyzed.

**Key words:** calibration, accepted reference value, virtual model, complex profile surfaces.

Эффективность поверочно-калибровочных работ во многом определяется состоянием и экономико-технологической доступностью эталонной базы для пользователей. Однако в настоящее время эталонная база стремительно устаревает морально и физически, что не позволяет в необходимом объеме с требуемым качеством обеспечить поверку и калибровку как существующих, так и вновь вводимых в эксплуатацию средств измерений (СИ) нового технического уров-

ня [1]. Вместе с тем развитие современных информационных технологий и имеющаяся нормативно-техническая база [2] создали для некоторых видов СИ предпосылки практической реализации вариантов проведения поверочно-калибровочных работ, альтернативных существующим.

Предлагаемая статья посвящена одному из вариантов такой реализации, в ней рассмотрен вопрос возможности и целесообразности создания в качестве согласованного для

сравнения принятого опорного значения виртуальных моделей контрольных образцов, используемых для калибровки СИ геометрических параметров пространственных поверхностей — турбинных лопаток, оболочек двойной кривизны, зубчатых колес и других деталей и элементов машин.

Использование опорных значений на базе виртуальных моделей при проведении поверочно-калибровочных работ заключается в следующем [3]. Опорные значения получают в организациях государственной метрологической службы посредством измерений геометрических параметров физического образца (реальный объект измерения или подобный ему типовой контрольный образец) при помощи высокоточных СИ на основании аттестованных и согласованных с существующей поверочной схемой методик. По результатам измерений строится опорная сетка оцифрованных координат реперных точек, по значениям которых формируется виртуальная (аппроксимационная) модель конфигурации измеренной поверхности [4].

Образец, для которого определены опорные значения, отправляется потребителю и используется им в качестве рабочего квазисталона для калибровки (или поверки) СИ, его геометрические параметры оценивают рабочими средствами, применяемыми для измерений или контроля аналогичных или подобных образцу изделий. По каналам связи полученные результаты передают в государственную метрологическую организацию (или в метрологическую службу предприятия), сравнивают с опорными значениями физического образца и выносят решение о степени метрологической пригодности рабочего СИ.

Неоднозначность получаемой виртуальной модели и ее применение в качестве опорного значения определяется погрешностью используемого для оцифровки СИ и выбранным алгоритмом формирования конфигурации моделируемой поверхности, обеспечивающим инвариантность пространственного положения реперных точек. Поэтому для практического использования такой модели рационально выбирать указанный алгоритм, который не содержит сложных и громоздких вычислений и показывает с заданной точностью высокую сходимость при численных решениях задач идентификации действительной конфигурации моделируемой поверхности.

В качестве одного из таких алгоритмов используют моделирование (в понятиях клеточного автомата), позволяющее учесть основные составляющие точности получения опорных значений и не усложняющее при этом виртуальную модель [5].

При формировании виртуальной модели реального образца элементы автомата представляют собой ячейки трехмерной сети, наложенной на моделируемую поверхность (рис. 1, а). Возможное расположение находящейся внутри каждой объемной ячейки сетки реперной точки  $A$ , рассматривается как доверительная область действительного значения координат этой точки. Каждая ячейка, соответствующая реперной точке, представляет собой бистабильный элемент, который либо воспроизводит координаты положения действительной идентифицируемой точки реальной физической поверхности с заданной точностью, либо нет. Погрешность  $\Delta$  бистабильного элемента может скачкообразно из-

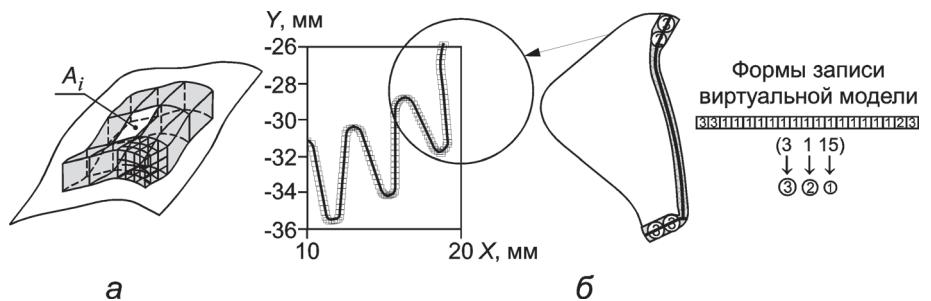


Рис. 1. Формирование виртуальных опорных значений поверхностей:  
 а — в общем случае; б — применительно к контуру профиля зуба шестерни

меняться, что приводит к переводу ячейки в следующую по точности группу, когда  $\Delta \geq \Delta_{kp}$ , где  $\Delta_{kp}$  — критическое значение погрешности. В каждой группе точность ячейки, а следовательно и ее характерные размеры, могут меняться в диапазоне, заданном данной группой точности. Причинами перехода в следующую группу может служить как относительно невысокая точность измерений параметров контрольного образца, так и взаимосвязь с соседними ячейками.

Переход ячейки из состояния  $A_j^{(n)}$  в состояние  $A_j^{(n+1)}$  зависит от точности определения  $A_j^{(n)}$  и суммы состояний соседних с ней  $i$ -х ячеек  $A_i^{(n)}$ :

$$A_j^{(n+1)} = F \left[ A_j^{(n)}, \sum_{i=1}^N A_i^{(n)} \right]. \quad (1)$$

Формирование виртуальной модели требуемой точности обеспечивается набором элементов  $A_j^{(n)}$  и  $\sum_{i=1}^N A_i^{(n)}$ , характерный размер которых имеет значение, соответствующее заданной погрешности, и определяет состояние бистабильной среды в целом.

Количество соседних ячеек определяется выбором конфигурации сетки. При моделировании пространственных поверхностей ячейка клеточного автомата представляет собой многогранник, описанный вокруг сферы, радиус которой пропорционален характеристическому размеру ячейки.

Поскольку одну и ту же поверхность по одним и тем же реперным точкам можно аппроксимировать различными наборами многогранников, для конкретного контрольного образца виртуальных моделей может быть получено множество. Поэтому возникает задача выбора модели, которая будет наиболее адекватна опорному значению.

Очевидно, что в зависимости от степени кривизны поверхности для оценки ее параметров формы требуются различная точность и соответственно различное количество реперных точек на данной поверхности. Поэтому разбиение диапазона возможных характерных размеров ячейки на  $k$  интервалов зависит от скорости изменения криволинейности поверхности на данном участке. Скорость изменения криволинейности поверхности (рис. 2) можно найти исходя из

значений хорды  $\rho$  (длина перпендикуляра, опущенного из данной точки на касательную к поверхности в предыдущей точке) или градиента  $Grad$ , определяемого как отношение изменения угла  $\Delta\phi$  между векторами касания в соседних точках к расстоянию  $\Delta l$  между этими точками, по следующим выражениям:

$$\rho = \frac{U_i(X_{i+1}-X_i)+V_i(Y_{i+1}-Y_i)+W_i(Z_{i+1}-Z_i)}{\sqrt{U_i^2 + V_i^2 + W_i^2}}, \quad (2)$$

$$Grad = \frac{\Delta\phi}{\Delta l} = \arccos \left( \frac{\frac{U_i U_{i+1} + V_i V_{i+1} + W_i W_{i+1}}{\sqrt{U_i^2 + V_i^2 + W_i^2}}}{\sqrt{U_{i+1}^2 + V_{i+1}^2 + W_{i+1}^2}} \right), \quad (3)$$

где  $X_i, Y_i, Z_i, X_{i+1}, Y_{i+1}, Z_{i+1}$  — координаты по осям  $OX, OY, OZ$   $i$ -й и  $(i+1)$ -й точек, соответственно;  $U_i, V_i, W_i, U_{i+1}, V_{i+1}, W_{i+1}$  — координаты, задающие вектор касания в указанных точках.

Принадлежность  $i$ -й реперной точки каждому из  $k$  интервалов заданных размеров ячеек находят с учетом оценки значения степени изменения криволинейности поверхности в данной точке, вычисляемой согласно (2) или (3). На этой основе формируется разнотолщинная трехмерная сеть, наибольшая частота реперных точек в которой будет сконцентрирована в местах с наибольшей кривизной поверхности (см. рис. 1, б). С учетом того, что при идентификации возможный размер ячейки сети ограничивается метрологическими характеристиками применяемого СИ, точность определения положения координат реперных точек в зоне наибольшей кривизны контрольного образца должна в соответствии со сложившейся практикой на порядок превышать точность калируемого (проверяемого) СИ. Это приводит к тому, что исходное, применяемое при идентификации СИ формирует большее количество точек с требуемой погрешностью, чем калируемое СИ. Поэтому в состав виртуальной модели вводится алгоритм приведения полученных опорных значений к виду, позволяющему сравнивать их с результатами, полученными с использованием калируемого СИ. Таким обра-

зом, виртуальная модель представляет собой электронный документ (файл), который содержит опорные значения, информацию о точности исходного СИ, его погрешности и области применения опорных значений (для каких СИ и условий окружающей среды они получены), а также программу пересчета опорных значений для калируемых средств. Для одного и того же контрольного образца может быть получен набор опорных значений для калибровки различных СИ, имеющих разную точность, в том числе и при разных температурных или других внешних воздействиях.

Исходными данными для программы пересчета опорных значений являются: размер ячеек контрольного автомата, критерии, на основании которых будет проводиться этот пересчет (хорда или градиент угла), погрешность измерения калируемого СИ. Например, программа может представить опорные значения как (см. рис. 1, б):

количество ячеек каждого размера на анализируемом участке криволинейной поверхности, например (3 1 15), где ячейки расположены в порядке убывания, т. е. имеются 3 ячейки наименьшего размера, 1 ячейка из средней размерной группы и 15 из максимальной;

размеры ячеек в виде матрицы или цепочки данных (для двухмерного случая), где номер в ячейке клеточного автомата соответствует принадлежности к  $k$ -й группе размеров ячеек), например (3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 3), где 1 соответствует наибольшая ячейка, а 3 — наименьшая.

При создании виртуальных моделей следует иметь в виду, что неточность каждой из них — случайный процесс с малой долей случайной составляющей и неизвестной по величине и систематической по природе ошибкой интерполяции. Эта ошибка может быть уменьшена путем использования нескольких виртуальных моделей, опорная сеть реперных точек которых определяется при помощи различной измерительной аппаратуры, имеющей близкие значения погрешности.

Так как нормативно-техническая база для контроля параметров точности цилиндрических зубчатых колес и калибровки соответствующих средств контроля является наиболее полно разработанной и широко используемой на практике [6—10], то для оценки возможности использования виртуальных моделей при калибровке (а в перспективе — и по-

верке) СИ геометрических параметров пространственных поверхностей было определено опорное значение для зубчатого колеса с эвольвентным профилем зуба ( $m = 2,5$ ,  $z = 34$ ,  $da = 72$  мм). За повторяемую базу принята совокупность цилиндрической поверхности, предназначеннной для посадки зубчатого колеса на вал, и шпоночного паза, задающего ось симметрии.

Идентификационные измерения проводили на координатно-измерительной машине O-Inspect Standard O-I 442 фирмы Carl Zeiss с измерительным щупом длиной  $L = 60$  мм и диаметром сферы  $D = 2$  мм. Скорость измерения  $v = 1$  мм/с, шаг  $s = 0,3$  мм, погрешность измерений при получении координат точек неизвестной поверхности  $MPE_E = 1,9 + L/250$  мкм. Для проверки сопоставимости результатов измерения были продублированы на координатно-измерительной машине OPTON UPMC 850 (Carl Zeiss) с измерительным щупом длиной  $L = 20$  мм и диаметром сферы  $D = 2$  мм. Скорость измерения  $v = 0,5$  мм/с, шаг  $s = 0,2$  мм, погрешность измерения при получении координат точек неизвестной поверхности  $MPE_E = 0,7 +$

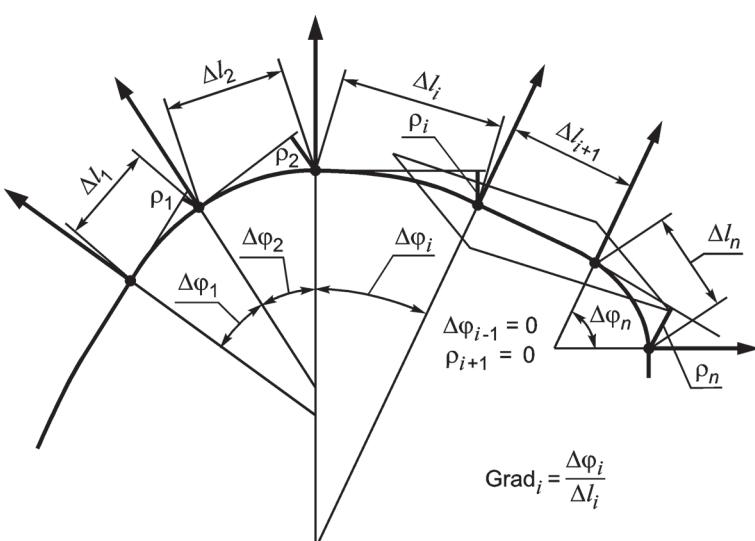


Рис. 2. Схема оценки скорости изменения криволинейности поверхности

## Линейные и угловые измерения

$+ L/600$  мкм. Метод измерений — контактный. Стратегия измерений — неизвестное сечение. Обе машины соответствуют государственной поверочной схеме на уровне рабочих эталонов второго разряда.

В результате измерений на O-Inspect O-I 442 (см. рис. 1, б) было получено 8 массивов данных, содержащих  $n = 1500$  точек и представляющих собой совокупность координат каждой точки и вектора касания, нормального к данной точке поверхности, а при проведении аналогичных измерений на OPTON UPMC 850 был получен массив данных, содержащий  $n = 2220$  точек.

Кроме измерений 68 эвольвентных поверхностей были измерены линии вершин и впадин каждого зуба. В качестве примера в табл. 1 и 2 представлены типичные фрагменты

**Приведенные опорные значения для эвольвентного профиля зуба в зависимости от калибруемого и исходного по точности СИ**

Исходное по точности СИ	Погрешность поверяемого СИ $\Delta$ , мкм	Характерный размер ячеек в каждом диапазоне, мкм	Приведенная матрица опорных значений	
			хорда	градиент
OPTON UPMC 850 Исходная матрица опорных значений: хорда (0 0 20), градиент (1 0 19)	10	0...1; 1...1,75; 1,75...2,5	0 0 10	2 5 3
	20	0...2; 2...3,5; 3,5...5	0 0 8	1 0 7
O-Inspect O-I 442 Исходная матрица опорных значений: хорда (1 1 10), градиент (2 2 8)	10	0...1; 1...1,75; 1,75...2,5	1 1 8	2 2 6
	20	0...2; 2...3,5; 3,5...5	1 2 5	2 1 5

Причайне. Матрица опорных значений записывается в виде матрицы количества ячеек в порядке уменьшения их размеров, т. е. в матрице (1 0 19) 1 — количество ячеек наименьшего размера, 0 — ячеек среднего размера, 19 — ячеек минимального размера

полученных экспериментальных результатов.

Из данных табл. 1 следует, что при изменении точности модели полученные значения опорные подчиняются однотипным закономерностям. Это подтверждает возможность формирования на единой модельной основе опорных значений для калибровки СИ различных точности, принципа действия, конструктивного исполнения, но предназначенных для однотипных целей.

Анализ массива данных позволяет сделать следующие выводы:

при числе многократных измерений, проводимых для определения координат реперной точки, меньшем пяти,

координаты, как правило, не сходятся с контрольной кривой, т. е. виртуальную модель, принятую за опорные значения, нельзя считать достоверной;

для эвольвентной поверхности число интервалов размеров ячеек, равное трем, является необходимым и достаточным для построения адекватной модели. Увеличение этого числа не меняет характеристику опорных значений, но увеличивает количество ячеек наименьшего и среднего размеров, что приводит к резкому возрастанию объема вычислений;

метод описания степени изменения криволинейности с использованием хорд более чувствителен к изменению точности измерений поверхности по сравнению с методом градиентов, однако метод описания скорости измерения

**Таблица 2**

**Опорные значения, полученные для различных частей эвольвентного профиля при разном количестве интервалов размеров ячеек**

Кривая, для которой получены опорные значения	Количество $k$ интервалов разбиения	Опорные значения, полученные для					
		эвольвентного профиля		эвольвентного профиля и линии вершин зуба		эвольвентного профиля, линий вершин и впадин зуба	
		хорда	градиент	хорда	градиент	хорда	градиент
Опорная кривая	3	1 1 10	1 0 11	3 1 12	1 0 15	3 2 14	1 0 18
	5	1 0 1 1 10	1 0 0 0 12	2 1 1 1 11	1 0 0 0 15	2 1 1 2 15	1 0 0 2 16
Кривая 3	3	1 1 10	1 0 11	3 1 12	1 0 15	4 1 14	1 0 18
	5	1 0 1 1 10	1 0 0 0 12	2 1 0 2 11	1 0 0 0 15	2 2 0 2 13	1 0 0 2 16
Кривая 4	3	1 1 10	1 0 11	3 1 12	1 0 15	3 1 15	1 0 18
	5	1 0 1 1 10	1 0 0 0 12	2 1 1 1 11	1 0 0 0 15	2 1 1 1 14	1 0 0 2 16
Кривая 5	3	1 1 10	1 0 11	3 1 12	1 0 15	3 1 15	1 0 18
	5	1 0 1 1 10	1 0 0 0 12	2 1 1 1 11	1 0 0 0 15	2 1 1 1 14	1 0 0 2 16
Контрольная кривая	3	1 1 10	0 0 12	1 0 15	1 0 15	1 8 10	2 0 17
	5	0 0 0 0 13	1 0 0 4 8	1 0 0 0 15	1 0 0 0 15	1 2 4 4 8	1 0 0 1 17

Причайне. Опорная кривая построена на основе многократных измерений на O-Inspect O-I 442, контрольная кривая — при измерениях на OPTON UPMC 850.

<sup>1</sup> Под воспроизводимостью в данном случае понимается количество совпадающих результатов двух разных СИ, а под чувствительностью — доля значений, отличающихся для каждой  $i$ -й кривой от опорной.

кривизны с применением градиентов дает лучшую воспроизводимость<sup>1</sup>;

результаты эксперимента не противоречат результатам, полученным при использовании стандартного программного обеспечения, прилагаемого к упомянутым выше координатно-измерительным машинам.

Экспериментальная проверка подтвердила принципиальную возможность алгоритмического описания идентификации контрольных образцов пространственных поверхностей, позволяющего с известной степенью точности определить опорные значения (построить виртуальные модели) для физического образца сложной формы. Полученные значения целесообразно использовать при калибровочно-поверочных работах в области измерений геометрических параметров пространственных поверхностей, так как их применение:

упрощает создание базы рабочих эталонов для их использования в локальных поверочных схемах, что будет способствовать повышению качества калибровки СИ;

дает возможность во многих случаях проводить поверочно-калибровочные работы на местах применения или хранения контрольно-измерительных средств с дистанционной оценкой их пригодности без демонтажа или изъятия из технологического процесса, что позволяет формировать базы данных для прогноза и оценки метрологической надежности эксплуатируемого парка этих СИ;

создает предпосылки для автоматизации проведения поверочно-калибровочных работ на единой централизованной методической базе, основанной на современных информационных технологиях, что упрощает обеспечение единства измерений;

позволяет исходя из фактических значений реперных точек контрольного образца корректировать в процессе эксплуатации его опорные значения, что дает возможность для отдельных объектов и условий измерений создавать наборы опорных значений, соответствующих разным уровням поверочных схем, используя для этого рациональные по точности СИ.

Сказанное выше применимо в случае калибровки (проверки) контактных СИ. Бесконтактные средства, такие как сканирующие головки, позволяют определить только коор-

динаты точек и не дают информации о векторе касания, т. е. нормали к поверхности в данной точке, что усложняет формирование опорных значений по изложенной методике. Однако высокая производительность бесконтактных СИ создает предпосылки для применения более совершенных методов машинной обработки цифровой информации больших объемов.

### Л и т е р а т у р а

1. Приказ Минпромторга РФ от 17.06.09 № 529 «Об утверждении стратегии обеспечения единства измерений в России до 2015 года».
2. ГОСТ Р ИСО 5725-1—2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 1. Основные положения и определения.
3. Скрипка В. Л., Зеленкова М. В. Перспективы совершенствования калибровки средств измерений геометрических параметров пространственных поверхностей // Метрология. 2013. № 3. С. 3—10.
4. Болотов М. А., Чевелева А. О., Жидяев А. Н. Оптимизация методик измерения геометрических параметров деталей ГТД при их контроле на КИМ // Вестник СГАУ. 2011. № 3(27). С. 157—165.
5. Чуличков А. И. Математические методы нелинейной динамики. М.: Физматлит, 2000.
6. ГОСТ 8.181—76. ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений параметров эвольвентных поверхностей.
7. ГОСТ 8.376—80. ГСИ. Эвольвентометры универсальные. Методы и средства поверки.
8. ГОСТ 1643—81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски.
9. ISO 1328-1:1995. Cylindrical gears — ISO system of accuracy — Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth.
10. ISO 1328-2:1997. Cylindrical gears — ISO system of accuracy — Part 2: Definitions and allowable values of deviations relevant to radial composite deviations and runout information.

Дата принятия 16.01.2013 г.