

Модель для оценки погрешности измерения геометрических параметров сложных поверхностей

Н.В. Рузанов¹, М.А. Болотов¹, В.А.Печенин¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Результаты измерения геометрических параметров сложных поверхностей существенно зависят от параметров проведения измерения. Использование различных алгоритмов обработки результатов измерения, реализованных в программном обеспечении координатно - измерительных машин, дает различающиеся значения указанных параметров. В представленной работе рассматривается модель для оценки погрешностей измерения геометрических параметров сложных поверхностей, вызванных использованием различных инструментов для обработки результатов измерения. Представленная работа состоит из нескольких этапов: создание поверхностей с известным отклонением формы и расположения, моделирование процесса координатных измерений, расчет целевых параметров в программном обеспечении координатно – измерительных машин и анализ результатов моделирования. Проведена апробация модели на примере определения погрешности измерения эвольвентных поверхностей зубчатых колес. Представленная модель может быть использована для определения оптимальных параметров измерения геометрических параметров сложных поверхностей.

1. Введение

Развитие инструментов для конструирования и обработки продукции машиностроения привело к широкому использованию деталей, имеющих сложную форму. К таким деталям относятся лопатки компрессоров и турбин авиационных двигателей [1], гравюры штампов и прессформ, поверхности оптических систем [2], зубчатые колеса зубчатых передач. Поверхности подобных деталей не могут быть точно представлены с помощью широко используемых ранее поверхностей – плоскостью, конусом, сферой и т.п., поэтому инструменты контроля, разработанные ранее, плохо подходят для проведения инструментального контроля деталей со сложными поверхностями.

Для решения задачи контроля геометрических параметров деталей со сложными поверхностями широкое распространение получили координатно–измерительные машины. Координатно–измерительные машины (КИМ) являются универсальными машинами, способными проводить измерение различной продукции. Программное обеспечение КИМ осуществляет управление аппаратной частью измерительных машин и обеспечивает обработку результатов измерения. Универсальность координатно–измерительных машин приводит к тому, что в программном обеспечении КИМ реализован широкий набор алгоритмов обработки результатов измерения.

Множество алгоритмов обработки результатов измерения приводит к возникновению проблемы определения методов, которые необходимо использовать при измерении конкретных типов поверхностей. Использование различных алгоритмов дает различные значения геометрических параметров измеряемых поверхностей. Вследствие этого актуальной задачей становится задача определения погрешности измерения геометрических параметров сложных поверхностей, возникающей из-за использования различных методов обработки информации.

Погрешность измерения можно оценить при помощи двух подходов: на основе практических экспериментов и на основе численного моделирования процесса измерения. Первый подход основан на измерении сложных поверхностей заранее известной формы и сравнение вычисленных геометрических параметров поверхности с действительными параметрами, заложенными при производстве поверхности. Данный подход сложно реализовать, так как требует создания точных моделей сложных поверхностей и существенных временных затрат на проведение большого количества измерительных экспериментов.

В данной работе рассматривается второй подход – использование численного моделирования процесса измерения сложных поверхностей, определения их геометрических параметров и сравнение результатов вычислений с действительными параметрами.

2. Модель для оценки погрешности измерения геометрических параметров

Рассмотрим модель оценки погрешности измерения геометрических параметров сложных поверхностей на примере эвольвентных поверхностей. Данные поверхности широко используются для описания профиля зубчатого колеса – основной детали зубчатых передач. Зубчатые передачи широко используются в сельскохозяйственном, транспортном и химическом машиностроении. Необходимым условием надежности и долговечности данных передач является точность изготовления эвольвентных профилей зубчатых колес, используемых в данных передачах. Для оценки точности изготовления эвольвентных профилей используется такой геометрический параметр как отклонение формы действительного профиля от его номинального значения.

Структура разработанной модели представлена на рис. 1.

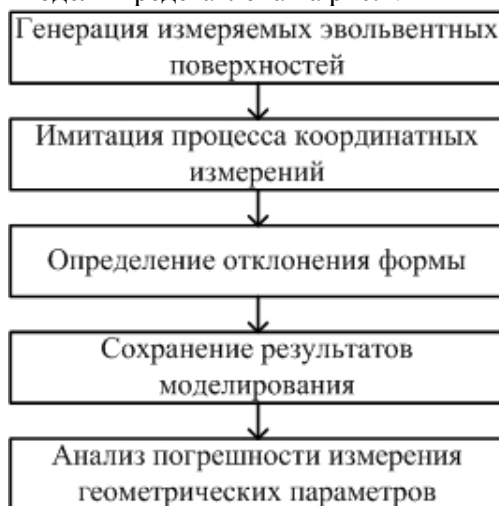


Рисунок 1. Структура модели.

Номинальный эвольвентный профиль описывается системой уравнений (1)[3]:

$$\begin{cases} x(t) = \frac{D_w}{2} (\cos(t) + t * \sin(t)) \\ y(t) = \frac{D_w}{2} (\sin(t) - t * \cos(t)) \end{cases} \quad (1)$$

где x , y – координаты точки эвольвентного профиля;

D_w – диаметр делительной окружности;

t – параметр.

Анализ результатов измерений эталонных и рабочих зубчатых колес позволил выявить, что отклонение формы имеет гармонический характер. Для моделирования отклонения формы профиля использовалась функция вида (2):

$$\Delta F = A * \sin(k * t), \quad (2)$$

На третьем этапе к модели профиля с отклонением формы добавлялось отклонение расположения с параметрами смещения и разворота:

$$\begin{pmatrix} x_{\text{фр}} \\ y_{\text{фр}} \end{pmatrix} = MR^{-1} \begin{pmatrix} x_{\text{ф}} \\ y_{\text{ф}} \end{pmatrix} + MT, \quad (3)$$

где $x_{\text{фр}}$, $y_{\text{фр}}$ – координаты точки эвольвентного профиля с учетом отклонения формы и расположения;

$x_{\text{ф}}$, $y_{\text{ф}}$ – координаты точки эвольвентного профиля с учетом отклонения формы;

D_w – диаметр делительной окружности;

MR – матрица поворота системы координат;

MT – вектор переноса системы координат.

Данная модель изменения поверхности была реализована в системе Matlab и результатом его работы являются САД модели измеряемых эвольвентных поверхностей в формате IGES. В ходе разработки модуля была проведена проверка соответствия результирующих поверхностей аналитическим выражениям, закладываемым в модель генерации измеряемых эвольвентных поверхностей.

На следующем этапе происходит численное моделирование координатных измерений приложением «Виртуальная координатно–измерительная машина». В данное приложение загружаются номинальная и фактическая эвольвентные поверхности, указывается план измерения и параметры моделирования инструментальной погрешности. После указания всех необходимых параметров происходит моделирование процесса координатных измерений. Достоверность результатов моделирования подтверждается соответствием данного приложения требованиям к метрологическому программному обеспечению, подтверждаемому сертификатом, выданным Всероссийским научно – исследовательским институтом метрологической службы.

В результате моделирования формируется набор измеренных точек эвольвентной поверхности. При помощи модуля обработки результатов измерения данный набор экспортировался в приложение PC-DMIS.

Специализированное программное обеспечение PC-DMIS, используемое совместно с координатно–измерительными машинами позволяет вычислить отклонение формы – один из основных параметров, характеризующий качество изготовления эвольвентной поверхности. Для вычисления данного параметра происходит предварительное совмещение измеренных точек [4] и затем вычисляется максимальное отклонения точек измеренного профиля от точек номинального профиля.

На заключительном этапе происходит сохранение параметров эксперимента в базу данных. В качестве указанных параметров выступают следующие переменные:

1. Параметры генерации измеряемого профиля (функция, амплитуда, частота и пр.)
2. Параметры моделирования процесса координатных измерений (план измерения, величина инструментальной погрешности)
3. Результаты вычисления отклонения формы, полученных при помощи использования различных алгоритмов расчёта данного параметра

Реализованная модель воспроизводит процесс измерения эвольвентной поверхности с учетом воздействия факторов, указанных выше. За счёт выбора различных значений воздействующих факторов и проведения моделирования измерения формируется база данных измерений эвольвентных поверхностей.

По результатам анализа полученной базы данных проводится оценка влияния различных факторов на неопределенность измерения геометрических параметров эвольвентных поверхностей.

3. Аппробация предложенной модели

В ходе проведения экспериментов были созданы модели эвольвентного профиля, имеющие отклонение формы, указанное на рисунке 2.

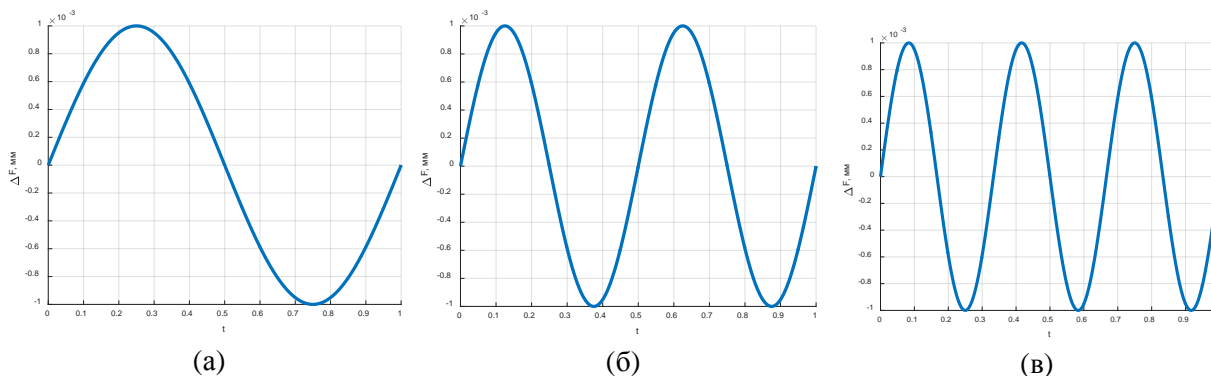


Рисунок 2. Функции отклонения формы для моделирования эвольвентных профилей а) k=2, б) k=4, в) k=6.

В качестве параметров отклонения расположения использовались параметры, указанные в таблице 2.3. Значения данных параметров были выбраны исходя из практических измерений эвольвентных зубьев и отраслевых документов на эвольвентные поверхности [5].

Таблица 1. Параметры отклонения расположения.

№	dX (мкм)	dY (мкм)	dAlpha (рад)	№	dX (мкм)	dY (мкм)	dAlpha (рад)
1	0	0	0,000000	7	28	0	-0,000066
2	28	0	0,000000	8	28	0	0,000815
3	0	28	0,000000	9	0	28	-0,000066
4	0	0	-0,000066	10	0	28	0,000815
5	0	0	0,000815	11	20	20	-0,000066
6	20	20	0,000000	12	20	20	0,000815

Для моделирования инструментальной погрешности измерения КИМ использовались случайные величины, полученные по нормальному закону распределения и имеющие 95% доверительный интервал с величинами 1, 2, 3 и 4 мкм. Параметры инструментальной погрешности приняты на основе анализа точностных характеристик, полученных из паспортов различных КИМ. Каждый эксперимент по моделированию измерения сформированных номинального профиля и профиля с отклонением формы и расположения повторялся 30 раз. Для каждого задаваемого отклонения формы профиля выполнялись исследования с различными вариантами расположения из таблицы 1. Таким образом, всего было выполнено: $3 \times 12 \times (4 + 1) \times 30 = 5400$ численных экспериментов.

Результатом каждого численного эксперимента является оценка отклонения вычисленного отклонения формы от отклонения формы, заданного на этапе формирования модели профиля.

$$\sigma = \Delta F_{calc} - \Delta F, \tag{4}$$

Данная величина и параметры моделирования модели поверхности сохранялась в базе данных для последующей обработки.

4. Результаты экспериментальных исследований

В ходе экспериментальных исследований был накоплен большой массив информации о связи параметров отклонения формы профиля, инструментальной погрешности КИМ и вычисленным

отклонением формы. На рисунке 3 показан результат проведения эксперимента для одного значения амплитуды отклонения формы и величины инструментальной погрешности.

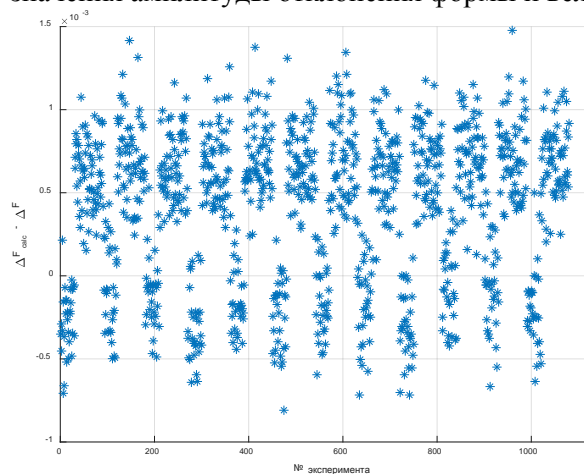


Рисунок 3. Отклонения вычисленного отклонения формы от отклонения формы, заданного на этапе формирования модели профиля. $A=0.001$, доверительный интервал 1мк.

Распределение отклонения формы для данной серии экспериментов представлено на рис.4.

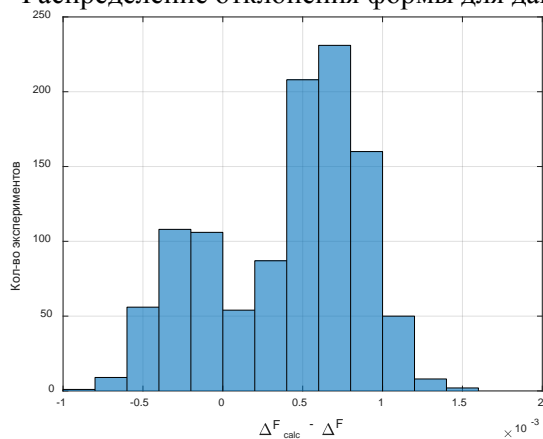


Рисунок 4. Распределение отклонения вычисленного отклонения формы от отклонения формы, заданного на этапе формирования модели профиля. $A=0.001$, доверительный интервал 1мк.

Обобщенная информация о погрешности измерения отклонения формы эвольвентного профиля представлена в таблице 2.

Таблица 2. Результаты оценки погрешности определения отклонения формы.

№	Допустимое отклонение профиля, мкм (коэффициент A в формуле xxx)	Неопределённость средства измерения, мкм	Стандартная неопределённость, мкм	Математическое ожидание, мкм
1		1	0,4662	0,4013
2		2	0,5657	1,1472
3	±1	3	0,6389	2,0692
4		4	0,8011	3,0575
5	±4	2	1,5765	0,4249

5. Выводы

При контроле геометрических параметров деталей, имеющих сложные поверхности, необходимо уделять повышенное внимание точности измерения данных параметров. Использование различных параметров проведения измерения или алгоритмов обработки результатов приводит к появлению несовпадающих значений геометрических параметров для одних и тех же деталей. Практическая оценка погрешности измерения сложно реализуема,

поэтому для получения данной оценки необходимо использовать методы математического моделирования.

В данной работе представлена модель для оценки погрешности измерения геометрических параметров сложных поверхностей на основе численного моделирования процесса измерения на примере изучения эвольвентных поверхностей.

На первом этапе происходит формирование модели действительной поверхности с заданными параметрами отклонения формы и расположения профиля.

Действительная и номинальная модели передаются в модуль численного моделирования координатных измерений. Данный модуль имитирует измерение поверхности с помощью контактного метода измерения, а также позволяет моделировать воздействие случайных факторов на результаты измерения.

Результаты численного моделирования измерения профиля передаются в специализированное программное приложение PC-DMIS, которое предназначено для взаимодействия с координатно-измерительными машинами и обработки результатов измерения. На данном этапе происходит определение ключевых геометрических параметров поверхности, которые в дальнейшем экспортируются в базу данных. Также в базу данных экспортируются параметры, характеризующие процесс моделирования действительной поверхности и проведения измерения.

Экспериментальные исследования на примере изучения эвольвентных поверхностей показали, что отклонение измеренных параметров от их действительного значения может достигать существенных величин, порой превышающих допустимые значения.

Предложенная методика может быть использована как для оценки погрешности измерения поверхности, так и для определения оптимальных параметров процесса измерения с целью достижения требуемой точности измерения.

6. Благодарности

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках реализации программы повышения конкурентоспособности Самарского университета среди мировых ведущих научно-образовательных центров на 2013-2020 годы.

7. Литература

- [1] Крымов, В.В. Производство лопаток газотурбинных двигателей / В.В. Крымов, Ю.С. Елисеев, К.И. Зудин. – М.: Машиностроение/Машиностроение-Полет, 2002. – 376 с.
- [2] Kazanskiy, N.L. Optical system for realization selective laser sublimation of metal alloys components / N.L. Kazanskiy, S.P. Murzin, V.I. Tregub // *Computer Optics*. – 2010. – Vol. 34(4). – P. 481-486.
- [3] Ташкинова, Е.В. Построение эвольвентных профилей зубьев колес методом обкатки: метод. указания к лабораторной работе / Е.В. Ташкинова. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 18 с.
- [4] Tian, H. ICP registration technology based on the coordinate system direction fit / H. Tian, P. Yang, C. Su, Z. Dong // *International Journal of Security and its Applications*. – 2015. – Vol. 9(12). – P. 47-56.
- [5] ОСТ 1.41671-77. Колеса зубчатые цилиндрические авиационные. Допуски.

Model for estimating the error in measuring geometric parameters of complex surfaces

N.V. Ruzanov¹, M.A. Bolotov¹, V.A. Pechenin¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. The results of measuring the geometric parameters of complex surfaces depend significantly on the parameters of the measurement. The use of various algorithms for processing measurement results implemented in the software of coordinate measuring machines gives different values for these parameters. In this paper, we consider a model for estimating the errors in measuring the geometric parameters of complex surfaces caused by the use of various tools for processing the measurement results. The presented work consists of several stages: creation of surfaces with a known deviation of shape and location, modeling of the process of coordinate measurements, calculation of target parameters in the software of coordinate measuring machines and analysis of simulation results. Approbation of the model on the example of the determination of the error in the measurement of the involute surfaces of the cogwheels is carried out. The presented model can be used to determine the optimal parameters for measuring the geometric parameters of complex surfaces.

Keywords: involute surfaces, accuracy improvement, coordinate measuring machines, measurement uncertainty, mathematical model, product quality.