

Модель и программный модуль для прогнозирования погрешностей координатных измерений в NX OPEN API

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

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

Аннотация. В САМ-системах (Computer-aided manufacturing) существует возможность имитировать процесс измерения на станке и координатно-измерительной машине, и генерировать соответствующие команды измерения в управляющей программе. Измерения могут служить основой для реализации различных схем адаптивной обработки. Главное достоинство состоит в том, что по результатам измерения можно автоматически скорректировать процесс обработки, не снимая детали со станка. При измерении сложнопрофильных деталей на станке и координатно-измерительной машине (штампы, лопатки двигателей) существенно возрастают неопределенности измерения, расчет которых в современных САМ-системах (например, NX от компании SIEMENS и CATIA от компании Dassault Systèmes) при построении управляющих программ не производится. Это может привести к потере точности изготовления (вследствие недостаточной точности измерений) при внешне отлаженной программе обработки. В работе предложены модель и программный модуль для прогнозирования погрешностей измерений, реализованное средствами NX OPEN API, которое может быть интегрировано в модуле САМ.

1. Введение

Для измерения сложных поверхностей деталей используются трёхосевые координатно-измерительные машины (КИМ), оснащенные измерительными наконечниками (ИН) сферической формы. На рисунке 1 приведена схема измерения сложной поверхности с использованием ИН сферической формы на КИМ.

Координатные измерения сложных поверхностей производятся в следующей последовательности:

1. Выполняется подвод ИН к измеряемой поверхности по заданным координатам номинальной точки до соприкосновения с действительной поверхностью.
2. При соприкосновении измерительного наконечника и действительной поверхности производится сохранение координат центра сферы ИН.
3. Производится расчет координат точки касания сферы исходя из координат центра измерительного наконечника и вектора нормали в точке номинальной поверхности.

При измерении поверхности наКИМ возникает погрешность нахождения координат точки, вызванная отклонением направления нормали реального профиля в измеряемой точке от номинального направления (ошибка компенсации радиуса ИН).

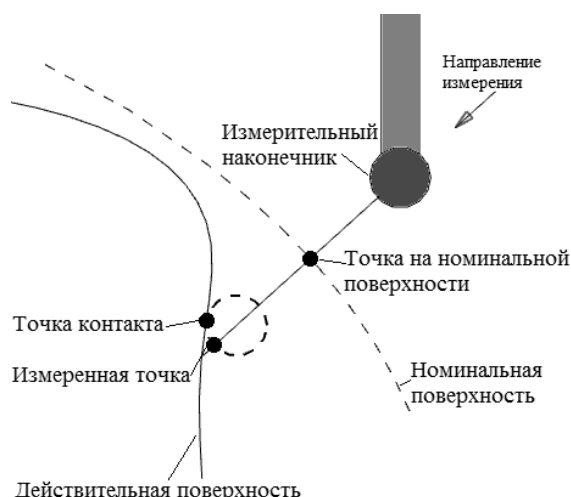


Рисунок 1. Измерение сложнопрофильной поверхности.

2. Модель и программный модуль координатных измерений

Для решения задачи обеспечения точности и производительности процесса координатных измерений, необходимо иметь его математическое описание. Так же бывает необходимо сравнивать различные подходы к расчету параметров [1-3]. Описание необходимо для Возникающие погрешности возможно оценить с помощью подхода «Виртуальная КИМ» [4], то есть создать математическую модель и реализующие ее программные алгоритмы координатных измерений.

Чтобы оценить возникающие погрешности была создана модель, позволяющая рассчитывать координаты точки касания, координаты центра ИН и координаты измеренных точек при контакте с поверхностью детали.

На рисунке 2 представлена блок-схема этапов, входящих в созданную модель.

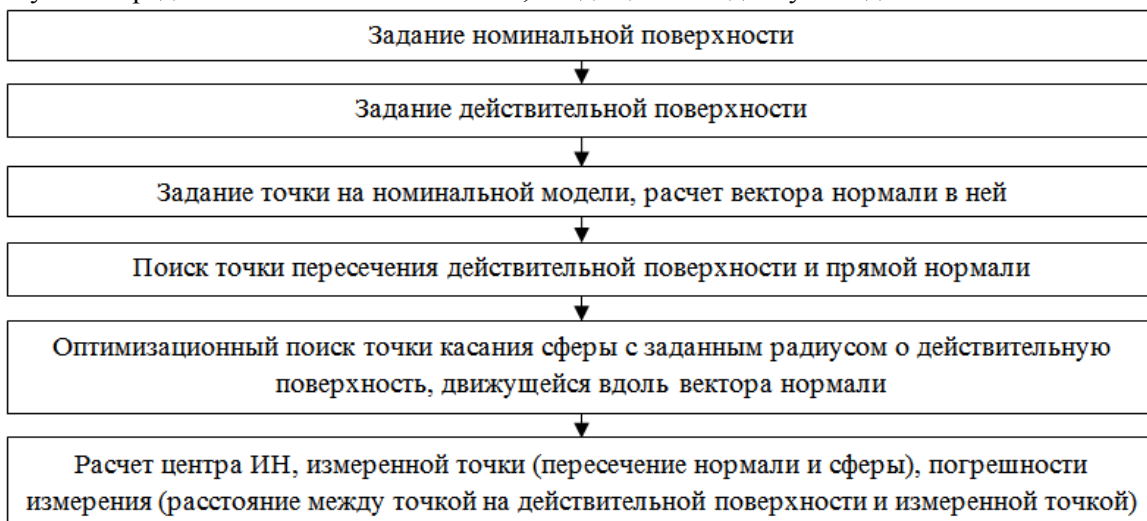


Рисунок 2. Этапы модели процесса координатных измерений.

Таким образом созданная модель позволяет рассчитывать координаты точки касания ИН о действительную поверхность S , координаты точки центра ИН O и координаты измеренных точек E [5].

Координаты измеренных точек E рассчитываются на расстоянии радиуса измерительного наконечника R по направлению нормалей от точек O по формуле:

$$E = O + R \cdot N_{comp}, \tag{1}$$

где N_{comp} - нормаль компенсации радиуса.

В рассмотренной модели не учитываются случайные составляющие погрешности измерения, составляющие ± 2 мкм. Данные погрешности рассматриваются как шум, существуют различные методы его удаления при обработке измеренной информации [6, 7] В случае, когда при измерении есть эталонная CAD-модель, координаты измеренных точек рассчитываются на пересечении нормалей N_{comp} к поверхности CAD-модели и сферы измерительного наконечника (например, измерение зубчатого венца). В случае измерения поверхности геометрического примитива (сфера, конус, цилиндр, плоскость), эквидистантная поверхность описывается уравнением соответствующего примитива по методу наименьших квадратов (МНК) в массиве точек O [8]. По уравнению эквидистантной поверхности переопределяются направляющие векторы нормалей N_{comp} в точках O .

Таким образом, с помощью разработанной модели можно оценить погрешности компенсации радиуса измерительного наконечника. Погрешность компенсации радиуса измерительного наконечника в i -й точки измерения рассчитывалась по формуле:

$$\delta_{Rcomp} = \|C_i - E_i\|, \quad (2)$$

Разработанная модель была реализована в виде программного приложения в модуле NX/OpenAPI на языке программирования VisualBasic. Таким образом, с помощью модуля NX/OpenAPI был разработан программный продукт, работающий как полностью интегрированная «внутренняя» функция NX с расширением *.dll.

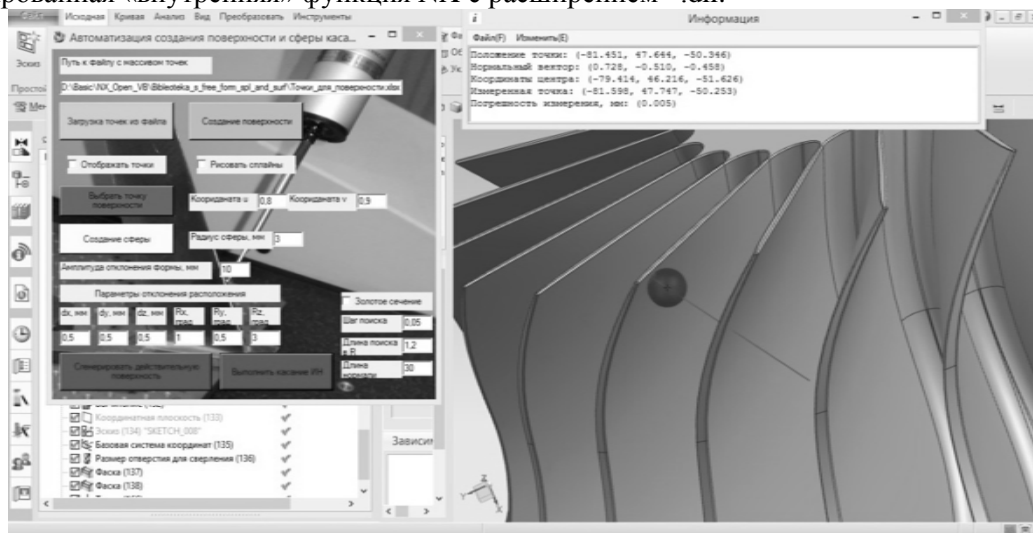


Рисунок 3. Виртуальное измерение точки поверхности.

Для решения оптимизационной задачи поиска точки касания использовались следующие оптимизационные методы: метод равномерного поиска и метод золотого сечения. Отличием от существующих решений NX в области задания операций измерений (операция Probing в модуле NXCAM) является расчет фактической погрешности измерения, в то время как стандартные инструменты САМ реализуют лишь автоматизацию создания управляющей программы измерений без учета возникающих погрешностей.

На рисунке 3 представлен внешний вид интерфейса программного приложения и результаты его работы на примере измерения точки на поверхности лопатки центробежного компрессора.

В отдельном информационном окне выводится информация о координатах точек и погрешности измерения. В модуле так же реализована возможность автоматизированной генерации действительной поверхности, имеющей геометрические отклонения.

3. Оценка точности измерений зубчатого колеса

Разработанная модель и реализующее ее программное приложение были применены для исследования погрешностей процесса измерений цилиндрического зубчатого колеса КИМ. В

таблице 1 приведены основные геометрические размеры и допуски рассматриваемого зубчатого колеса со степенью точности 6-5-5 ГОСТ 1643-81 [9] (ОСТ 1.41671-77 [10]).

Таблица 1. Геометрические параметры и допуски зубчатого колеса.

Параметр	Обозначение	Величина	Параметр	Обозначение	Величина
Число зубьев	z	24	Диаметр начальной окружности, мм	d_w	126,295
Модуль, мм	m	5,6	Толщина зуба по дуге делительной окружности, мм	S_t	12,47
Угол зацепления, °	α	20	Шаг, °	τ	15
Ширина венца, мм	b	78,89	Допуск на радиальное биение зубчатого венца, мкм	F_r	50
Коэффициент смещения	x	0,90116	Предельные отклонения шага зацепления, мкм	$\pm f_{pb}$	± 9
Диаметр делительной окружности, мм	d	134,4	Допуск на погрешность профиля зуба, мкм	f_f	8
Диаметр вершин зубьев, мм	d_a	155,693	Нормы бокового зазора (показатели E_{CS} и T_C), мкм	E_{CS}	110
Диаметр впадин зубьев, мм	d_f	130,493		T_C	100

Виртуальное измерение эвольвентных поверхностей зубьев производилось с 5% отступом от границ этих поверхностей для исключения влияния неровностей, встречающихся на границе поверхностей. В процессе моделирования измерений применялась стратегия, при которой точки располагаются в виде сетки (рисунок 4), с количеством N точек вдоль эвольвентного профиля зуба и M сечений по ширине зубчатого венца. При моделировании боковые поверхности зубьев измерялись с параметрами $N=10$ и $M=5$.

Радиус измерительного наконечника КИМ при проведении измерений выбран 0,5 мм.

Было осуществлено моделирование 50 зубчатых колес, имеющих отклонения формы и расположения от номинальной САД-модели в пределах допусков, указанных в таблице 1. Для каждого случая производилась компьютерное моделирование контактного измерения и расчет погрешностей определения точки поверхности зубчатого венца δ_{Comp} (2).

На рисунке 5 приведены гистограммы распределения погрешностей измерения δ_{Comp} левых и боковых сторон зубьев для 50 экспериментов при измерении всех зубьев каждого колеса.

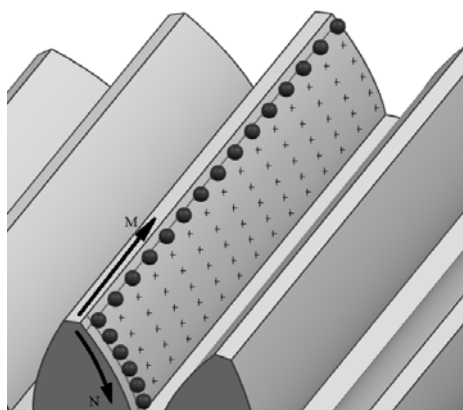


Рисунок 4. Стратегия измерения боковой поверхности зуба.

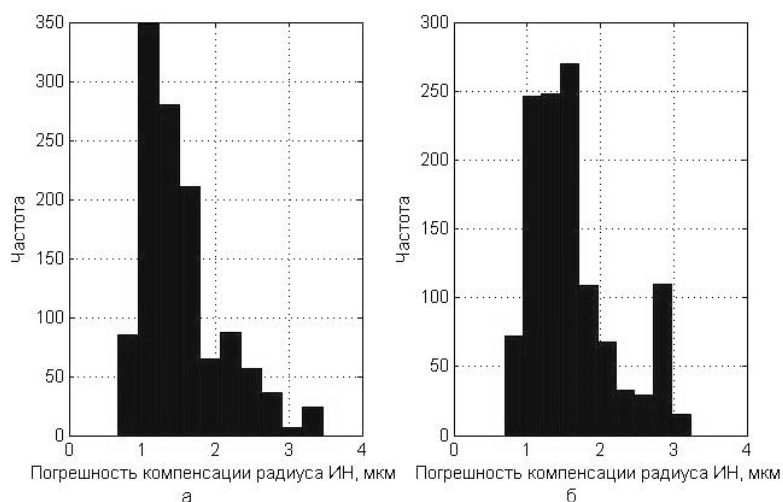


Рисунок 5. Гистограммы погрешности δ_{Rcomp} правых (а) и левых (б) сторон зубьев.

Анализируя гистограммы рисунка 5 было установлено что погрешности компенсации распределены по β -закону.

В таблице 2 приведены наиболее вероятные (E) и предельные абсолютные значения (минимальное – Min , максимальное – Max) погрешностей δ_{Rcomp} для выборки зубчатых колес с уровнем доверительной вероятности 99,73%.

Таблица 2. Абсолютные значения погрешности измерения δ_{Rcomp} зубчатых колес.

Страна зуба	μ , мкм	σ , мкм	min, мкм	max, мкм
Левая	1,6	0,6	0,7	3,4
Правая	1,6	0,6	0,7	3,2

Как следует из таблицы, погрешности измерения не превышают 4 мкм. Таким образом, на основании проведенного компьютерного моделирования можно сделать вывод, что координаты точек зубьев при выбранной стратегии измерения и отклонениях геометрии определяются достаточно точно и по результатам полученных данных можно проводить дальнейшие расчеты параметров точности колеса.

4. Выводы

В работе предложена модель для прогнозирования погрешностей компенсации радиуса измерительного наконечника сферической форме при контроле поверхностей на КИМ. Модель реализована в виде программного модуля средствами NX OPEN API, который может быть интегрирован в модуль САМ при разработке управляющих программ для учета возникающих погрешностей измерения. Помимо рассмотренной проблемы компенсации радиуса измерительного наконечника, существующего из-за несовершенства программного обеспечения, существуют и другие факторы погрешностей, связанные в основном с точностью конструкции самих измерительных машин. Паспортные погрешности КИМ составляют в среднем от -2 мкм до 2 мкм и характеризуются неравномерностью срабатывания измерительного датчика и погрешностями изготовления направляющих движения осей [11]. Помимо этих погрешностей существует погрешность шага дискретизации при подводе ИН к измеряемой точке, вызванная погрешностью шага интерполяции при управлении сервоприводами, которые приводят в движения оси КИМ. Эти факторы мало исследованы и фактически не учитываются в различных программных пакетах САМ, в то время как погрешность шага дискретизации может вносить достаточно крупный вклад в величину общей погрешности измерения. В дальнейшем планируется провести моделирование остальных

составляющих погрешности и выполнить сравнение результатов моделирования с результатами экспериментов.

5. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания на 2018 год. Шифр проекта 9.11978.2018/11.12.

6. Литература

- [1] Doskolovich, L.L. On using a supporting quadric method to design diffractive optical elements / L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev, N.L. Kazanskiy // *Computer Optics*. – 2015. – Vol. 39(3). – P. 339-346.
- [2] Soifer, V.A. Synthesis of a binary DOE focusing into an arbitrary curve, using the electromagnetic approximation / V.A. Soifer, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov // *Optics and Lasers in Engineering*. – 1998. – Vol. 29(4-5). – P. 237-247.
- [3] Doskolovich, L.L. Calculation of diffraction optical elements for focusing in out-axis radial focal regions / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.S. Pavel'ev, V.A. Sojfer // *Avtometriya*. – 1995. – Vol. 1. – P.114-119.
- [4] Trapet, E. The virtual CMM concept / E. Trapet, F. Waldele // *Singapore: World Sci*. – 1996. – P. 238-247.
- [5] Печенин, В.А. Модель оценки точности координатных измерений при контактном методе/ В.А. Печенин, М.А. Болотов, А.В. Рыжков // *Материалы международной научно-практической конференции «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн»*, Тамбов. – 2014 г. – С.215-220.
- [6] Сойфер, В.А. Анализ и распознавание наномасштабных изображений: традиционные подходы и новые постановки задач / Сойфер В.А., Куприянов А.В. // *Компьютерная оптика*. – 2011. – Т. 35, № 2. – С. 136-144.
- [7] Myasnikov, V.V. *Computer Image Processing. Part I: Basic concepts and theory* / V.V. Myasnikov, S.B. Popov, V.V. Sergeev, V.A. Soifer. – VDM Verlag, 2009.
- [8] Craig, M.S. Least-Squares Fitting Algorithms of the NIST Algorithm Testing System / M.S. Craig // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. – 1998. – 103(6). – P. 633-641.
- [9] ГОСТ 13755-81. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные. Исходный контур.
- [10] ОСТ 1.41671-77. Колеса зубчатые цилиндрические авиационные. Допуски.
- [11] ISO 10360. Acceptance and re-verification tests for Coordinate Measuring Machines.

Model and software module for predicting uncertainties in coordinate measurements in the NX OPEN API

V.A.Pechenin¹, N.V. Rusanov¹, M.A.Bolotov¹

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

Abstract. In CAM-systems (Computer-aided manufacturing), it is possible to simulate the measurement process on the machine and coordinate measuring machine, and generate measurement commands in the control program. Measurements can serve as the basis for the implementation of various adaptive processing schemes. The main advantage is that, based on the measurement results, you can automatically adjust the machining process without removing the parts from the machine. When measuring complex parts on the machine and coordinate measuring machine (stamps, engine blades), measurement uncertainties significantly increase, which are not calculated in modern CAM-systems (for example, NX from SIEMENS and CATIA from DassaultSystèmes). This can lead to a loss of processing precision (due to inadequate measurement accuracy) with an externally debugged program. The paper proposes a model and a software module for the prediction of measurement uncertainties, implemented by means of the NX OPEN API, which can be integrated into the CAM module.

Keywords: measuring process, model, measurement uncertainty, CAM.