

УДК 681.3

В.П. КВАСНИКОВ, Л.А. БОРКОВСКАЯ*Национальный авиационный университет, Украина***ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Разработана интеллектуальная система высокоточного измерения турбинных лопаток на координатно-измерительной машине. Определено количество точек контрольного сечения математической модели и соответствующее им количество точек измеренного сечения. Разработана математическая модель погрешности измерения турбинной лопатки.

газотурбинные двигатели, турбинные лопатки, координатно-измерительная машина, алгоритм измерения

Введение

Современный этап развития двигателестроения характеризуется принципиально новым подходом к проектированию высокоточных информационно-измерительных систем механических величин.

Одной из важнейших задач автоматизации измерений сложных пространственных поверхностей является создание современных систем управления измерительной головкой, обеспечивающих автоматическое выполнение измерений в соответствии с заданной программой, определяемой конкретной измерительной задачей [1].

Для контроля объектов со сложной пространственной поверхностью типа турбинной лопатки, которые аналитически не описываются, широко используют координатно-измерительные машины. Точность измерения на прецизионных координатно-измерительных машинах составляет 0,5 мкм, что не удовлетворяет требованиям к измерению деталей авиационной и приборостроительной отраслей [1 – 3].

Цифровые значения координат, полученные с помощью координатно-измерительных машин (КИМ), не решают полностью задачу контроля сложных пространственных поверхностей. Необходимо сравнить не только наборы точек, измеренных и полученных по математической модели, но и уравнения поверхностей.

Автоматические измерения могут выполняться в непрерывном или циклическом режиме. Задача оптимизации пути сканирования вдоль измеряемого объекта является наиболее актуальной.

Практическая ценность оптимального обхода объекта во многом определяется возможностями, которые создаются автоматическими системами управления, управляющими движениями измерительного наконечника.

Анализ существующих методов автоматического контроля деталей со сложными пространственными поверхностями в условиях гибких производственных систем показал, что функция контроля приобретает новое содержание и особое значение. Координатно-измерительные машины и измерительные работы с наибольшей степенью удовлетворяют требованиям авиационного производства, в котором реализуется интеллектуальная функция обработки измерительной информации, а также функции адаптации и обучения.

Для полного контроля деталей авиационная промышленность получила широкоуниверсальное, автоматическое, достаточно гибкое средство контроля – координатные измерительные машины, укомплектованные мини- или микро ЭВМ для управления КИМ и обработки результатов измерения [1, 2]. Важным достоинством КИМ является их пригодность для контроля дета-

лей со сложной поверхностью. Применение координатно-измерительных машин повышает точность и достоверность результатов измерения. Использование принципов оперативного и диалогового программирования дало возможность упростить применение КИМ в мелкосерийном производстве.

Постановка задачи. Разработать интеллектуальную систему высокоточного измерения турбинных лопаток на прецизионной координатно-измерительной машине на примере турбинной лопатки газотурбинных двигателей с определением количества точек измерения при заданной вероятности и определить погрешность измерения.

Решение задачи

Задача разработки интеллектуальной системы высокоточного измерения деталей со сложной пространственной поверхностью является весьма сложной, так как требует учета негауссовых помех при колебании механической части координатно-измерительной машины и точности позиционирования с учетом возмущающих воздействий измерительного датчика.

Для проведения измерений на КИМ не обходимо разработать структуру системы, программно-математическое обеспечение и алгоритм измерения

Положение и форма сложных профилей и поверхностей задаются набором значений координат точек относительно базовых поверхностей, в качестве которых обычно указываются простые граничные поверхности детали, содержащей данную сложную поверхность или профиль. Для оценки отклонений положения или формы поверхности должны быть известны (кроме координат) направления нормали к каждой точке номинального положения профиля или поверхности. Для известных поверхностей эти данные вводятся или вычисляются (для аналитически заданных поверхностей и профилей), для неизвестных – оцениваются путем измерения образцов или моделей в целях расчета их номинальных парамет-

ров для проверки поверхностей или профилей соответствующего типа. Разработанный алгоритм измерения турбинных лопаток представлен на рис. 1.

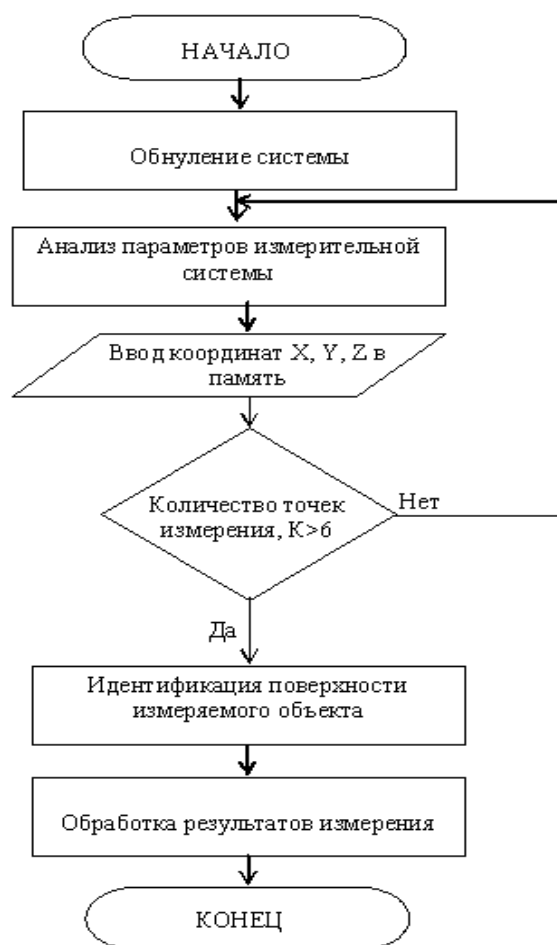


Рис. 1. Алгоритм измерения турбинных лопаток на координатно-измерительной машине

Погрешности измерения определяются следующей зависимостью:

$$\vec{\Delta r}_0 = \sum_{i=0} A_{0i} \delta A_i A_{ij} \vec{r}_l;$$

$$\delta_1 = \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f_1}{\partial q_j} \right) \delta q_j; \dots \delta_L = \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f_L}{\partial q_j} \right) \delta q_j,$$

где $\vec{\Delta r}_0$ – векторная погрешность положения точки измеряемой поверхности с радиусом-вектором $\vec{r}_0$; A_{0i} , A_{il} – матрицы преобразований координат от 0-го к i -му и от i -го к l -му звеньям механической части соответственно; δA_i – вариация вектора $A_{il} \vec{r}_l$; $\vec{r}_l$ – радиус-вектор измерительной головки; $f_1, \dots, f_l$ –

уравнения связей; L – число связей; $q_j = (j = \overline{1, m})$ – переменные, входящие в матрицу $A\Sigma$; δq_j – вариация переменных q_j ; $\delta_1 \dots \delta_L$ – погрешность связей.

Вариация δA_i может быть представлена в виде суммы трех матриц

$$\delta A = \delta_{\text{деф}} + \delta_{\text{нов}} + \delta_{\text{пер}},$$

где $\delta_{\text{деф}}$ – матрица деформации, $\delta_{\text{нов}}$ – матрица чистого поворота, $\delta_{\text{пер}}$ – матрица чистого переноса.

Алгоритм совмещения контрольных обводов математической модели и измеряемого объекта.

После базирования физической модели на ней производится ряд кольцевых замеров, соответствующих контрольным обводам (сечениям) математической модели. Точки замеренного сечения b^i лежат в одной плоскости. Рассмотрим совмещение контрольных обводов математической модели и измеряемого объекта на примере турбинной лопатки.

Число точек в сечении M зависит от геометрии конкретного сечения. Каждое замеренное сечение необходимо совместить с соответствующим ему сечением математической модели. Для этого его нужно повернуть на угол α и сдвинуть на вектор P в плоскости сечения.

Необходимо найти точки c^i , лежащие на измеренном сечении и соответствующие точкам a^i сечения математической модели.

Для этого сначала находятся точки $c^{i(0)}$, лежащие на многоугольнике, соединяющем измеренные точки b^i так, что расстояние от точки a^i до точки $c^{i(0)}$ минимально. Последовательно определяются расстояния от точки a^i до каждого из отрезков $[b^j, b^{j+1}]$ $j = 1, \dots, M-1$. Точка d , соответствующая минимальному расстоянию, определяется из условия перпендикулярности вектора $(a^i - d)$ прямой, проходящей через точки b^j и b^{j+1} .

Прямая, проходящая через точки b^j и b^{j+1} , задается уравнением

$$d(t) = b^j + (b^{j+1} - b^j)t, \quad t \in [-\infty, \infty].$$

Условие перпендикулярности

$$(b^{j+1} - b^j)(a^i - d(t^*)) = 0.$$

Отсюда определяется значение параметра t^* :

$$t^* = \frac{(b_x^{j+1} - b_x^j)(a_x^i - b_x^j) + (b_y^{j+1} - b_y^j)(a_y^i - b_y^j)}{(b_x^{j+1} - b_x^j)^2 + (b_y^{j+1} - b_y^j)^2}$$

Однако, определенная таким образом точка $d(t^*)$ может лежать за пределами отрезка $[b^j, b^{j+1}]$, поэтому точка d , соответствующая минимальному расстоянию, определяется следующим образом:

$$d = \begin{cases} b^j, & t \leq 0; \\ d(t^*), & 0 \leq t \leq 1; \\ b^{j+1}, & t \geq 1. \end{cases}$$

Определив расстояния от точки a^i до каждого из отрезков $[b^j, b^{j+1}]$, выбираем тот отрезок, расстояние до которого минимально. Точка d , найденная на этом отрезке, и будет искомым точкой $c^{i(0)}$.

После этого определяется уточненная точка c^i . Для этого несколько точек измеренного сечения b^k , $k = j-L, \dots, j+L$, находящихся в окрестности найденной точки $c^{i(0)}$, аппроксимируются сегментом сплайна. С помощью вышеуказанной процедуры определяется точка c^i , соответствующая точке a^i . Таким образом, имеется N точек a^i контрольного сечения математической модели и соответствующие им N точек c^i измеренного сечения. Необходимо найти вектор P , на который нужно сдвинуть точки, и угол α , на который их нужно повернуть до полного совпадения.

Значения оптимальных объемов выборок m^* и n^* , необходимых для обеспечения достоверности измерения $1 - \alpha_0 = 1 - \beta_0 = 0,9 \dots 0,9999$ при точно-

сти измерения разности средних $a_{\varepsilon} = 0,1; 0,05$ и $0,01$ для турбинной лопатки приведены в табл. 1.

Анализируя результаты теоретических расчетов и проведенных экспериментов, можно отметить, что повышение уровня требуемой достоверности измерения турбинных лопаток до значения $0,99; 0,999$ и $0,9999$ при том же значении a_{ε} достигается путем достаточно умеренного увеличения объемов оптимальных обучающих $m^* = 234; 404$ и 581 и контрольных $n^* = 425; 632$ и 951 выборок.

Таблица 1

Значения оптимальных объемов выборок m^* и n^*

$1 - \alpha_0 = 1 - \beta_0$	$a_{\varepsilon} = 0,1$		$a_{\varepsilon} = 0,05$		$a_{\varepsilon} = 0,01$	
	m^*	n^*	m^*	n^*	m^*	n^*
0,9	42	61	130	269	440	610
0,99	130	182	410	658	1320	1850
0,999	260	380	880	1260	2600	3800
0,9999	330	540	1440	1980	3300	5400

Однако, дальнейшее повышение требований к точности измерения разности средних вплоть до $0,01$ приводит к сокращению минимально допустимого расстояния между средними значениями совокупностей до $0,01\sigma$ и к значительному увеличению обучающей и контрольной выборок вплоть до $m^* = 14750$ и $n^* = 75460$ при $1 - \alpha_0 = 0,9999$ и $a_{\varepsilon} = 0,01$. Это хорошо согласуется с физическими

представлениями, поскольку измерения с высокой достоверностью нормальных совокупностей требует достаточного эталонного описания измерительного объекта, т.е. получения более качественных оценок средних $\hat{a}_1$ и $\hat{a}_2$ и достаточно большого времени для принятия решения для обеспечения его высокой достоверности.

Выводы

Разработан алгоритм высокоточного автоматического измерения турбинных лопаток на координатно-измерительной машине. Определено количество точек контрольного сечения математической модели и соответствующее им количество точек измеренного сечения. Разработана математическая модель погрешности измерения турбинной лопатки.

Литература

1. Фокс А., Пратт М. Вычислительная геометрия. – М.: Мир, 1982. – 304 с.
2. Юнусов Ф.С. Формообразование сложнопрофильных поверхностей шлифованием. – М.: Машиностроение, 1987. – 248 с.
3. Перепилица Б.А. Отображение аффинного производства в теории формообразования поверхностей резанием. – Х.: Высш. шк., 1981. – 152 с.
4. Дружинский И.А. Сложные поверхности. Математическое описание и технологическое обеспечение. – Л.: Машиностроение, 1985. – 263 с.

Поступила в редакцию 1.06.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Г. Мелкумян, Национальный авиационный университет, Киев.