

МЕТОДИКА КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

©2016

В. А. Печенин аспирант кафедры технологий производства двигателей, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, vadim.pechenin2011@yandex.ru

Обработка сложнопрофильных деталей на станке с числовым программным управлением и контроль их геометрии производится по 3D-моделям, характеризующим эталонную деталь. В статье предлагается методика компенсации погрешностей изготовления, основанная на встраивании в технологический процесс механической обработки координатных измерений геометрии детали. Методика содержит изменение программы обработки посредством перестройки 3D-модели детали по информации об отклонениях, полученной после измерения. Методика позволяет осуществлять анализ результатов измерений и оперативную корректировку управляющих программ для металлообрабатывающего оборудования с числовым программным управлением. Анализ результатов измерений заключается в определении того, нужно ли проводить компенсацию погрешностей, и в фильтрации случайных составляющих погрешностей, не учитываемых при компенсации. Методика была реализована в виде программного обеспечения в пакете прикладных программ MATLAB. Оперативная корректировка управляющих программ для металлообрабатывающего оборудования позволит повысить качество выпускаемой продукции и эффективность производственных процессов.

Механическая обработка сложнопрофильной детали; методика компенсации погрешностей.

Цитирование: Печенин В.А. Методика компенсации погрешностей механической обработки сложнопрофильных деталей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 4. С. 252-264. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-252-264

Введение

Погрешности размеров (геометрических параметров) могут возникать как при обработке, так и при контроле деталей. Следовательно погрешности размеров можно разделить на погрешности обработки и погрешности измерения. Причём и погрешности обработки, и погрешности измерения носят одинаковый характер и подчиняются одним и тем же закономерностям.

В метрологии погрешности разделяются на случайные δ_c и систематические dF . Случайными называются погрешности, непостоянные по величине и знаку; систематическими – погрешности, постоянные по величине и знаку или изменяющиеся по некоторому закону.

Величину или знак каждой случайной погрешности нельзя заранее предугадать; величину, знак и тенденцию изменения систематической ошибки можно оценить заранее. Именно поэтому систематические погрешности сравнительно легко поддаются компенсации.

Таким образом, общую величину погрешности ε в каждой контролируемой точке поверхности детали можно записать в виде суммы двух составляющих:

$$\varepsilon = dF + \delta_c. \quad (1)$$

Задача компенсации технологических погрешностей решается наиболее полно, когда выходным параметром технологической системы является непосредственно регулируемый размерный (геометрический) параметр. Такая компенсация носит комплексный характер, поскольку в этом случае одновременно устраняется влияние износа режущего инструмента, тепловых и силовых деформаций [1]. Перспективным путём

является компенсация погрешностей программными методами. Его реализация возможна посредством корректировки траектории движения инструмента в ходе обработки для уменьшения или исключения действия погрешностей. Кратко охарактеризуем имеющиеся исследования по проблеме компенсации погрешностей программными методами.

В работе [2] рассмотрены проблемы обработки и описаны пути достижения требуемой точности и шероховатости поверхностей длинномерных лопаток моноколёс на основе применения переменной 3D-коррекции. Коррекция суммировалась из величины желаемого припуска на поверхности лопатки и износа радиуса сферической фрезы. Переменная коррекция позволяет изменять припуск вдоль высоты лопатки, автоматически изменяя величину коррекции на каждом витке фрезы. Данная методика трёхмерной коррекции была реализована на АО «Мотор Сич» при взаимодействии с ЗАО ГК «Постпроцессор» (г. Москва) и апробирована при высокоскоростной обработке моноколёс на станках фирмы HERMLE (C30U, C40U и C40U). Для измерения отклонений использовался встроенный контроль на станке. В качестве базовой системы расчёта траектории движения инструмента была применена CAD/CAM система NX. При помощи данной методики удалось добиться отклонения точек профиля 0,01-0,09 мм.

В работе [3] предложен расчётно-экспериментальный метод компенсации погрешности механообработки лопаток газотурбинного двигателя (ГТД) («Блиск») за счёт учёта погрешности, обусловленной упругой деформацией пера под действием силы резания. Апробация метода проводилась на фрезерном станке MTE 500V/5. Сначала проводилась обработка пера лопатки на заранее подобранных постоянных режимах резания; затем проводилось измерение профиля полученной поверхности и оценка погрешностей, построение скорректированной CAD-модели лопатки по принципу изменения профиля в тело детали на величину погрешности, создание с помощью САМ-системы новой управляющей программы на основе скорректированной твёрдотельной модели. Измерения отклонений осуществлялись по управляющей программе (УП) с помощью измерительного щупа Renishaw MP10, установленного в шпиндель главного движения станка, и оптического приёмно-передающего устройства Renishaw OMM. Корректировка модели проводилась с помощью API-функций CAD-системы DS Solidworks по данным из файла измерения поверхности пера. В результате применения данного метода удалось добиться снижения погрешности обработки на порядок: с 0,1-0,15 мм до 0,002-0,02 мм.

В [4] предложена модель ленточного шлифования пера лопаток компрессора ГТД, позволяющая осуществить адаптивное шлифование на станке Metabo 6NC-1000. Модель включает в себя: модель движений многокоординатного лентошлифовального станка с учётом упругих свойств технологической системы; модель деформации контактного элемента и заготовки сложной формы; модель формообразования поверхности. Перед проведением шлифования проводится замер профиля лопатки и анализ распределения припуска по каждому сечению. Применение данной модели позволило уйти от операции ручного полирования профиля лопатки и определить режимы обработки, соответствующие достижению наименьшей погрешности обработки профиля пера лопатки и прикромочных участков.

В статье [5] рассматривается как тема компенсации погрешностей обработки сложнопрофильных поверхностей, так и вопрос точного измерения данных поверхностей как элемента процедуры компенсации погрешностей обработки. Контроль обрабатываемой поверхности проводился на координатно-измерительной машине (КИМ) с использованием программного обеспечения (ПО) PC-DMIS. Рассматривается задача повышения точности компенсации радиуса измерительного наконечника (ИН) КИМ при расчёте координат точек и применяется методика расчёта координат, основанная

на задании поверхности по координатам центров ИН, и дальнейший пересчёт координат точек на величины радиусов ИН по направлениям нормалей в точках поверхности. Измеренные данные анализировались на наличие систематической составляющей, и регрессионная модель поверхности для компенсации задавалась с использованием NURBS-аппроксимации. Также в работе рассматривается применение данной методики при обработке фрезерованием кубического образца с одной сложнопрофильной обрабатываемой поверхностью. В результате удалось снизить возникающие погрешности обработки с 0,035-0,04 до 0,01-0,014 мм.

Анализируя вышеприведённые работы, укрупнённо можно выделить два варианта компенсации погрешностей программными методами. Первый вариант заключается в изменении 3D-модели поверхности лопатки таким образом, что возникающие отклонения в ходе обработки могут быть компенсированы при создании траектории движения инструмента в САМ-системе. Второй вариант заключается в изменении непосредственно управляющей программы, задающей траекторию движения инструмента. Компенсация погрешностей может быть реализована по результатам измерений на координатно-измерительных машинах, а также по измерениям непосредственно на оборудовании с помощью датчиков. И в первом, и во втором вариантах повышения точности посредством компенсации встречаются следующие проблемы:

- 1) недостаточная точность измеренных данных;
- 2) достоверность разделения случайных и систематических составляющих погрешностей;
- 3) отсутствие измеренных данных в некоторых областях поверхностей, недоступных для измерений.

Целью данной работы является создание методики компенсации погрешностей изготовления, основанной на встраивании в технологический процесс механической обработки координатных измерений геометрии детали.

Основная идея подхода компенсации погрешностей

На рис. 1 представлена схема, раскрывающая основную идею подхода компенсации систематических погрешностей обрабатываемой детали.

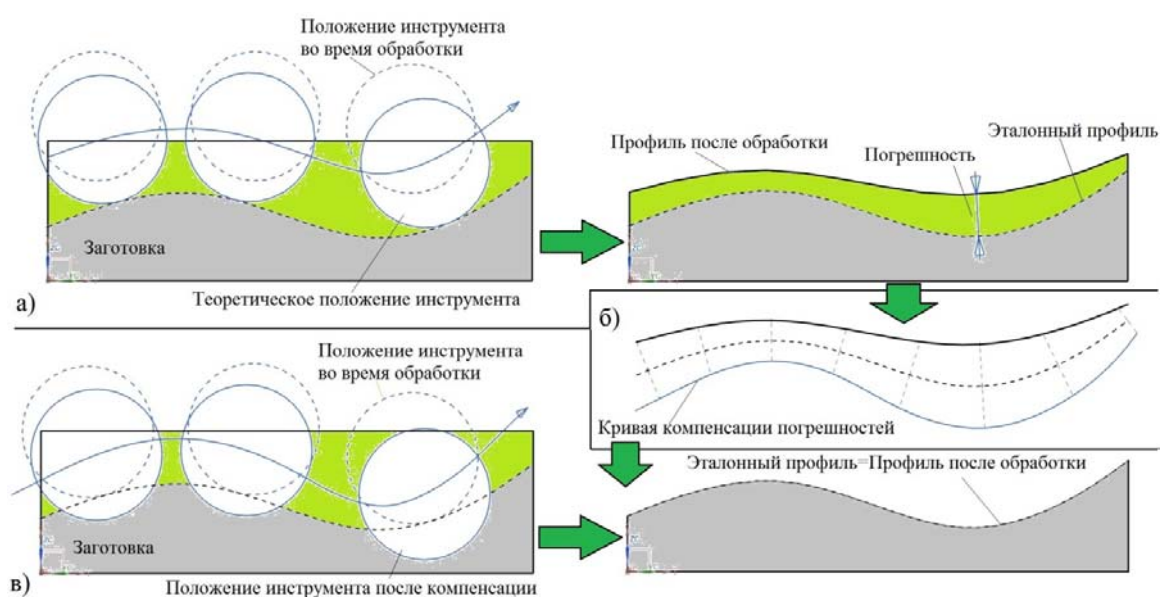


Рис. 1. Идея подхода компенсации систематических погрешностей: а – обработка без компенсации; б – расчёт поверхности компенсации; в – обработка по изменённой модели

Рассмотрим подробнее процесс компенсации систематических погрешностей на станках с числовым программным управлением (ЧПУ).

1. Производится обработка поверхности на фрезерном станке с ЧПУ (рис.1, а). В управляющей программе для станка обработка строится по эталонной САД-модели детали. Из-за наличия систематических и случайных погрешностей обработки существует несоответствие между эталонной и полученной поверхностью или же имеется неравномерность припуска, который остаётся после промежуточной обработки.

2. Деталь снимается со станка и переносится на стол КИМ или же измеряется непосредственно на станке (рис.1, б). Производится измерение геометрических погрешностей. Выполняется проверка: носят ли измеренные погрешности случайный характер. Если существуют систематические погрешности, то производится фильтр случайных погрешностей и процедура пересчёта поверхности на величину систематических погрешностей.

3. Производится экспорт сформированной поверхности в САД-модель детали и перестройка детали (рис. 1, в). В управляющую программу обработки загружается перестроенная модель, деталь возвращается на станок и обрабатывается. Таким образом, устраняются систематические погрешности обработки.

Математическое описание поверхностей сложнопрофильных деталей, имеющих погрешности обработки

Кривые и поверхности сложной формы в САД-системах и метрологическом обеспечении измерительного оборудования описываются сплайновыми уравнениями. Сплайн – кусочный полином степени K с непрерывной производной степени $K-1$ в точках соединения сегментов, называемых задающими точками. Для математического представления сложных поверхностей использован нормализованный кубический сплайн третьей степени – Эрмитова кривая [6].

В основе описания поверхностей деталей, имеющих геометрические отклонения формы, использовались поверхности, образованные из бикубических порций (порции Кунса). Описываемая поверхность представляет собой сегмент, соответствующий значениям параметров $0 \leq u \leq 1$, $0 \leq v \leq 1$. Порция Кунса образуется в результате сопряжения граничных сплайновых кривых и определяется выражением

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} u^i v^j, \quad (2)$$

где a_{ij} – алгебраические векторные коэффициенты с компонентами x , y , z .

Комбинирование порций Кунса позволяет определить поверхность произвольной формы и размера. Сплайновая поверхность определена в пространстве параметров u и v .

При помощи сплайновых уравнений производится моделирование поверхностей, имеющих различные геометрические погрешности. Погрешности обработки и случайные погрешности измерения моделировались вдоль поверхности. Координаты точек поверхности с учётом моделируемых погрешностей рассчитываются от координат точек на номинальной поверхности по нормалям

$$P_{\text{мод}}(u, v) = P(u, v) + \varepsilon(u, v) n(u, v), \quad (3)$$

где $P_{\text{мод}}(u, v)$ – координаты точек действительной поверхности с погрешностями обработки; $P(u, v)$ – соответствующие точки на номинальной поверхности, заданной со-

гласно (2); $\varepsilon(u, v)$ – общие величины погрешностей в точках; $n(u, v)$ – нормали в точках $P(u, v)$.

Систематические погрешности. В работе рассмотрены три модели, описывающие систематические погрешности: 1) основанная на значении средней кривизны поверхности; 2) заданная с помощью полинома; 3) равномерное отклонение, описываемое с помощью плоскости. Рассмотрим подробнее данные модели.

Погрешность формы, связанная с обработкой криволинейных поверхностей деталей, возникает в результате изменения кривизны обрабатываемого объекта при контакте режущего инструмента с поверхностью. Распределение этой погрешности можно вычислить, основываясь на значениях средней кривизны поверхности [7]:

$$dF = A_m (i_s - 0,5), \quad (4)$$

где A_m – максимальная погрешность обработки.

Индекс i_s определяется по формуле

$$i_s = (H - H_{\min}) / (H_{\max} - H_{\min}), \quad (5)$$

где H , H_{\min} и H_{\max} – соответственно значение средней кривизны в точке поверхности, минимальное и максимальное значение средней кривизны по всей поверхности.

Средняя кривизна представляет собой полусумму двух главных кривизн поверхности и для бипараметрических поверхностей (2) задаётся выражением [6]:

$$H = \frac{A|Q_v|^2 - 2BQ_uQ_v + C|Q_u|^2}{2|Q_u \times Q_v|^3}, \quad (6)$$

где $A = [Q_u \times Q_v] Q_{uu}$, $B = [Q_u \times Q_v] Q_{uv}$, $C = [Q_u \times Q_v] Q_{vv}$; Q_u , Q_v – частные производные первого порядка уравнения (2); Q_{uu} , Q_{vv} , Q_{uv} – частные производные второго порядка уравнения (2).

Систематическое отклонение может быть представлено посредством полинома n -й степени (степени полинома λ_u , λ_v задаются по двум параметрическим осям сплайновой поверхности). В работе был использован полином второй степени по осям u - v . Таким образом, формула расчёта систематического отклонения формы в виде полинома выглядит следующим образом:

$$dF = p_{00} + p_{10}u_n + p_{01}v_n + p_{20}u_n^2 + p_{11}u_nv_n + p_{02}v_n^2, \quad (7)$$

где $p_{0..2,0..2}$ – коэффициенты полинома; u_n, v_n – нормированная в диапазоне $[-1; 1]$ координата точек по осям u и v .

Нормирование необходимо для универсального подбора характера и амплитуды измерения отклонения на любую опорную длину профиля. Пересчёт координат производится по следующей формуле:

$$u_{n_i} = 2(u_i - u_{\min}) / (u_{\max} - u_{\min}) - 1, \quad (8)$$

где u_{\max}, u_{\min} – максимальное и минимальное значения координат x точек.

Равномерные систематические погрешности можно представить следующим образом:

$$dF = A_m = \text{const}. \quad (9)$$

Таким образом, данный вид систематической погрешности представляет собой плоскость.

Рассмотренные типы моделей описания систематических погрешностей представлены на рис. 2.

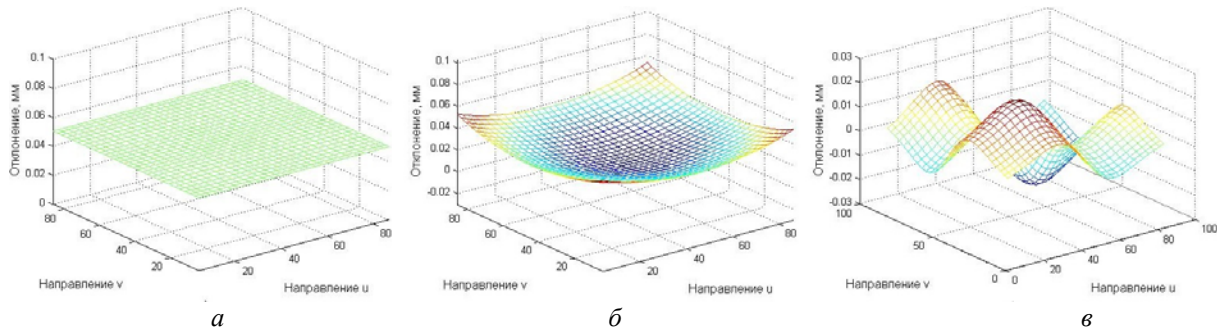


Рис. 2. Три типа систематических отклонений формы:
 а – равномерное отклонение; б – отклонение в виде полинома второй степени;
 в – отклонение по кривизне

На практике после обработки поверхности встречается сочетание отклонений формы. При апробации методики были применены две модели погрешностей: равномерная (9) и сочетание полиномиальной модели (7) и модели погрешности по кривизне (4).

Случайные погрешности. Наличие случайных погрешностей проявляется в том, что результаты оказываются различными при многократных повторных измерениях одной и той же неслучайной величины. Для современных контактных КИМ подобные погрешности составляют 0,7-2мкм, но при измерении сложных криволинейных поверхностей или при несоблюдении нормальных условий измерений данные погрешности могут быть выше. При измерении поверхностей с помощью лазерных и оптических средств (например, T-SCAN-CS и COMET 6 фирмы Steinbichler Optotechnik GmbH) величины погрешностей возрастают до 10-50 мкм. Рассеяние случайных погрешностей обычно подчиняется композиции законов распределения. При моделировании случайных погрешностей использовался равновероятностный и нормальный законы распределения. Моделируемые значения случайной составляющей отклонения δ_r не превышают 0,005 мм.

Расчёт систематических погрешностей обработки

Если после измерения детали рассчитанные погрешности по существу носят случайный характер, то проводить процедуру компенсации не требуется. Для того чтобы понять, есть ли систематические погрешности поверхности, рассчитывалась пространственная автокорреляция величин измеренных погрешностей.

Существуют различные тесты для проверки пространственной автокорреляции. Однако многие из них не дают полной информации о характере структурированности некоторого признака, а лишь служат для проверки гипотезы: близко расположенные регионы более похожи по некоторому признаку, а более отдалённые – менее похожи. В случае сложной структуры, когда отношения между соседними участками имеют «нелинейный» характер, более точную картину можно получить, используя показатели пространственной автокорреляции. В качестве такого показателя использовался коэффициент I Морана.

Показатель общей пространственной автокорреляции (статистика Морана I) [8] рассчитывается следующим образом:

$$I = \frac{n}{S_0} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})(\varepsilon_j - \bar{\varepsilon})}{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2}, \quad (10)$$

где $S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}$; ω_{ij} – вес, характеризующий измерение пространственной связи между i -м и j -м отклонениями:

$$\omega_{ij} = \begin{cases} d_{ij}^{-k} / L_i, & \text{при } i \neq j; \\ 0, & \text{при } i = j, \end{cases} \quad (11)$$

где d_{ij} – расстояние между i -м и j -м отклонениями; k – константа ($k \geq 1$); L_i – нормирующий коэффициент:

$$L_i = \sum_{j=1}^n d_{ij}^{-k}. \quad (12)$$

Выражения для расчёта математического ожидания μ_M и величины дисперсии D_M коэффициента Морана приведены в [9].

Проверка гипотезы о пространственно-статистической независимости значений погрешностей $\{\varepsilon_i\}$ производится в следующей последовательности:

1. Выдвигается нулевая (H_0) и альтернативная (H_a) гипотезы. H_0 говорит о том, что рассматриваемые погрешности статистически независимы; гипотеза H_a говорит о статистической связи рассматриваемых погрешностей.

2. Выбирается уровень значимости. Уровень значимости характеризует вероятность отвергнуть гипотезу, когда она верна. Был выбран наиболее используемый уровень значимости 0,05.

3. Производится статистический тест. Расчёт статистического отклонения критерия Морана производится по формуле

$$z = \frac{I - \mu_M}{\sigma_M}, \quad (13)$$

где $\sigma_M = \sqrt{D_M}$ – среднеквадратическое отклонение критерия.

4. Принимается решение о принятии или отвержении гипотезы H_0 . Если рассматриваемые отклонения имеют пространственную автокорреляцию, это говорит о том, что точки с близкими значениями отклонений находятся рядом. Для 0,05 уровня значимости стандартного нормального распределения критическое значение $z_{0,05}$ равно 1,96. Если $z < z_{0,05}$, то нулевая гипотеза принимается; в противном случае принимается альтернативная гипотеза. При принятии альтернативной гипотезы необходимо определить систематические погрешности геометрии.

Если после проведения теста Морана выясняется, что на обработанной поверхности присутствуют существенные систематические погрешности, то возникает необходимость удаления шума, представляющего собой случайные погрешности средства измерения. Проблемы, связанные с шумоподавлением, возникают при обработке изображений. Существуют многочисленные исследования и разработано множество алгоритмов шумоподавления именно для задачи обработки изображений, которые могут быть применены для шумоподавления при обработке измеренной информации [10; 11].

В разработанной методике для решения задачи шумоподавления применены два вида фильтров: билатеральный фильтр и сглаживающие сплайны.

Рассмотрим принцип их работы.

Билатеральное фильтрование впервые было представлено в [12]. Данная техника фильтрации используется в основном в задачах обработки изображений [13; 14] и применима для шумоподавления измеренных отклонений.

При работе билатерального фильтра производится вычисление величины отклонения в точке (для цифрового изображения – интенсивностью пикселя) как взвешенного среднего интенсивностей соседних величин отклонений в окрестности радиуса r . Вес соседних отклонений изменяется в соответствии со значениями расстояний между точками (пространственный вес) и со значением величины отклонений (интенсивности пикселей для изображений) в точках «ранговый фильтр». Наиболее широкое практическое применение получил билатеральный фильтр, основанный на функции Гаусса. Учитывая тот факт, что, как правило, случайные погрешности измерения подчиняются нормальному закону распределения [15], в работе был использован Гауссов билатеральный фильтр.

Билатеральный фильтр для множества отклонений (изображения) $\varepsilon(u)$ в точке определяется по формуле

$$\hat{\varepsilon}(u) = \frac{\sum_{p \in N(u)} W_c(\|p-u\|) W_s(|\varepsilon(u) - \varepsilon(p)|) \varepsilon(p)}{\sum_{p \in N(u)} W_c(\|p-u\|) W_s(|\varepsilon(u) - \varepsilon(p)|)}, \quad (14)$$

где $N(u)$ – окрестность точки u ; W_c – фильтр домена (Гауссов фильтр) с параметром σ_c ($W_c(x) = e^{-x^2/(2\sigma_c^2)}$); W_s – ранговый фильтр (весовая функция подобия) с параметром σ_s ($W_s(x) = e^{-x^2/(2\sigma_s^2)}$).

На практике (и в данной работе) окрестность $N(u)$ состоит из множества точек $\{q_i\}$, для которых выполняется неравенство

$$\|u - q_i\| < r, \quad (15)$$

где $r = 2\sigma_c$.

Случайная составляющая отклонения формы вычисляется соответственно в каждой точке по формуле

$$\delta_\phi(u) = \varepsilon(u) - \hat{\varepsilon}(u). \quad (16)$$

Таким образом, билатеральный фильтр имеет два основных параметра: σ_c и σ_s .

Сглаживающий сплайн – это методика сглаживания (аппроксимации кривой или поверхностью набора зашумлённых исходных данных) с использованием сплайн-функций [16]. Сглаженный сплайн $\hat{\varepsilon}$ множества отклонений ε минимизирует величину

$$p \sum_{i=1}^n w_i (\varepsilon(u_i) - \hat{\varepsilon}(u_i))^2 + (1-p) \int (D^2 \hat{\varepsilon}(u))^2 du \rightarrow \min, \quad (17)$$

где (u, ε) – аппроксимируемые данные (точка и величина отклонения в ней); p – параметр сглаживания $p \in [0, 1]$; w – вектор весов (принят за вектор единиц).

Таким образом, сплайн имеет единственный параметр p .

Процедура компенсации погрешностей обработки

Для проведения процедуры компенсации отклонения формы необходимо учесть отклонения граничных областей поверхностей, которые не были измерены. Так как систематические отклонения описываются в виде сплайновой поверхности, то возможно продлить её границы на небольшую величину и таким образом предсказать её поведение. Если отступ от границ поверхности невелик, как в рассматриваемом случае, то погрешность прогнозирования поверхности на областях отступа будет невелика и на точность учёта компенсации это существенно не повлияет.

Таким образом, была проведена кубическая экстраполяция сплайновой поверхности $dF(u, v)$, описывающей систематические погрешности, в областях отступа измерительного наконечника.

Точки компенсации поверхности $P_c(u, v)$ можно рассчитать по формуле [17]:

$$P_c(u, v) = P(u, v) - dF(u, v)n(u, v), \quad (18)$$

где $P(u, v)$ – соответствующие точки на номинальной поверхности, заданной с помощью (2); $dF(u, v)$ – рассчитанная систематическая составляющая отклонения; $n(u, v)$ – нормали в точках $P(u, v)$.

По рассчитанным точкам $P_c(u, v)$ задаётся соответствующая поверхность согласно выражению (2).

Основные этапы методики

Перечислим этапы методики компенсации погрешностей механической обработки сложнопрофильных деталей:

1. Задание количества и расположения точек измерения на обработанной поверхности. При этом, как правило, всегда есть отступ от границ поверхности.
2. Проведение измерений в соответствии с этапом 1.
3. Расчёт погрешностей в измеренных точках. Погрешности являются расстояниями от точек на математической модели детали до измеренных точек действительной поверхности.
4. Расчёт критерия Морана для проверки наличия систематических погрешностей. Если критерий имеет значение меньше критической величины, то процедуру компенсации проводить не нужно и на этом выполнение методики завершается. Если значение критерия превышает критическое, то переходят к следующему этапу.
5. Проведение декомпозиции погрешностей на случайный и систематический компоненты при помощи сплайнового и билатерального фильтров.
6. Проведение кубической экстраполяции систематических погрешностей в областях отступа измерительного наконечника от границ поверхности.
7. Расчёт точек компенсации поверхности, моделирование компенсационной поверхности. Замена компенсационной поверхностью имеющейся поверхности на 3D-модели детали, используемой в управляющей программе станка для проведения обработки.
8. Проведение обработки поверхности с использованием компенсационной модели детали, созданной на этапе 7.

Программная реализация методики

Разработанная методика была реализована в программном пакете MATLAB. Интерфейс программного обеспечения представлен на рис. 3.

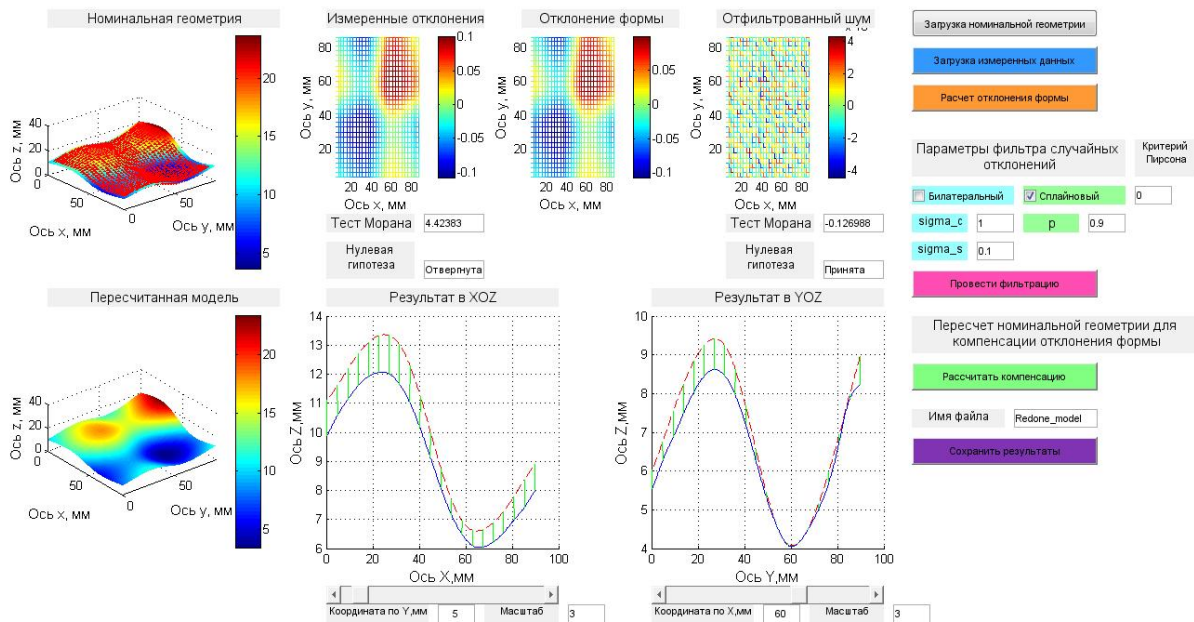


Рис. 3. Интерфейс программного обеспечения

В разработанном программном обеспечении производится загрузка номинальной поверхности при нажатии на кнопку «Загрузка номинальной геометрии». При нажатии на кнопку «Загрузка измеренных данных» в систему загружаются координаты измеренных точек и соответствующих им точек номинальной поверхности. Точки визуализируются в графическом окне «Номинальная геометрия» (рис. 3). При нажатии на кнопку «Расчёт отклонения формы» производится расчёт отклонений измеренных точек от их номинальных значений, характеризующихся систематическими и случайными погрешностями. Визуализация погрешностей производится в окне «Измеренные отклонения» (рис. 3). Для выявления автокорреляции измеренных погрешностей производится расчёт критерия Морана. Далее пользователю предоставляется выбор в использовании фильтра для декомпозиции случайных и систематических погрешностей. Пользователь использует для фильтрации «Билатеральный фильтр» или «Сплайновый фильтр». При нажатии на кнопку «Провести фильтрацию» (рис. 3) производится фильтр случайных погрешностей. Производится расчёт критерия Пирсона и тест Морана для отфильтрованных шумов. Пользователь может оперативно подобрать нужные для правильной фильтрации параметры, основываясь на графических окнах «Отфильтрованный шум» (рис. 3) и показателях критерия Пирсона и критерий Стьюдента для линейной автокорреляции.

После выполнения фильтрации производится пересчёт поверхности с учётом рассчитанных систематических погрешностей с помощью кнопки «Рассчитать компенсацию». Визуально пересчитанная модель представлена в окне «Пересчитанная модель». Можно детальнее посмотреть отклонения пересчитанной модели от номинальной в сечения XOZ и YOZ с помощью передвижения соответствующих ползунков и задания масштаба показываемых отклонений.

На заключительном этапе оператор выполняет сохранение пересчитанной поверхности в формате *.igs для экспорта в CAD/CAM систему посредством нажатия кнопки «Сохранить результаты». Имя сохраняемого файла вводится в соответствующем окне «Имя файла» (рис. 3).

Выводы

В предложенной методике компенсации погрешностей обработки сложнопрофильных деталей проводится фильтрация случайных погрешностей. Для проверки адекватности получаемых результатов фильтрации производится автоматизированный расчёт критериев Пирсона, Морана и абсолютный величины рассчитанных погрешностей. В отличие от известных подходов, в разработанной методике производится расчёт координат точек в областях поверхностей, недоступных для измерений методом сплайновой экстраполяции, которая необходима для получения эффекта компенсации по всей поверхности. Методика реализована в пакете прикладных программ MATLAB, что позволяет автоматизировать её реализацию при использовании в производственном процессе.

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 гг.

Библиографический список

1. Волосов С.С., Педь Е.И. Приборы для автоматического контроля в машиностроении. М.: Машиностроение, 1970. 310 с.
2. Мозговой В.Ф., Балушок К.Б., Котов И.И., Панасенко В.А., Бирук М.К. Стратегии обработки лопаток моноколес на обрабатывающих центрах с ЧПУ с переменной 3D-коррекцией // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2013. № 7 (104). С. 22-28.
3. Постнов В.В., Малахов Е.Н., Старовойтов С.В., Федоровцев А.Ю., Измайлова Н.Ф. Расчетно-экспериментальный метод компенсации погрешности механообработки лопаток газотурбинных двигателей на мехатронном станочном оборудовании // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2012. Т. 16, № 7(52). С. 145-153.
4. Волков Д.И., Коряжкин А.А. Адаптивное ленточное шлифование лопаток ГТД на многокоординатном станочном оборудовании // *Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П.А. Соловьёва*. 2013. № 1 (24). С. 42-48.
5. Poniadowska M. Free-form surface machining error compensation applying 3D CAD machining pattern model // *Computer-Aided Design*. 2015. V. 62. P. 227-235. DOI: 10.1016/j.cad.2014.12.003
6. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М. Мир. 2001. 604 с.
7. Rajamohan G., Shunmugam M.S., Samuel G.L. Effect of probe size and measurement strategies on assessment of freeform profile deviations using coordinate measuring machine // *Measurement*. 2011. V. 44, Iss. 5. P. 832-841. DOI: 10.1016/j.measurement.2011.01.020
8. Moran P. Notes on Continuous Stochastic Phenomena // *Biometrika*. 1950. V. 37. Iss. 1/2. P. 17-23. DOI: 10.2307/2332142

9. Ufton G., Fingleton B. Spatial data analysis by example categorical and directional data. New York: Wiley, 1989. 432 p.
10. Fleishman S., Drori I., Cohen-Or D. Bilateral mesh denoising // ACM Transactions on Graphics. 2003. V. 22, Iss. 3. P. 950-953. DOI: 10.1145/882262.882368
11. Abdul-Rahman H.S., Jiang X.J., Scott P.J. Freeform surface filtering using the lifting wavelet transform // Precision Engineering. 2013. V. 37, Iss. 1. P. 187-202. DOI: 0.1016/j.precisioneng.2012.08.002
12. Tomasi C., Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 1998. P. 839–846. DOI: 10.1109/ICCV.1998.710815
13. Eisemann E., Durand F. Flash photography enhancement via intrinsic relighting // ACM Transactions on Graphics. 2004. V. 23, Iss 3. P. 673-678. DOI: 10.1145/1015706.1015778
14. Durand F., Dorsey J. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images // ACM Transactions on Graphics. 2002. V. 21, Iss. 3. P. 257-266. DOI: 10.1145/566654.566574
15. Sprauel J.M., Linares J.M., Bachmann J., Bourdet P. Uncertainties in CMM measurements, Control of ISO specifications // CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2003. V. 52, Iss. 1. P. 423-426. DOI: 10.1016/s0007-8506(07)60616-7
16. De Boor C. A Practical Guide to Splines (Revised Edition). New York: Springer, 2001. 348 p.
17. Yang B.-D., Menq C.-H. Compensation for form error of end-milled sculptured surfaces using discrete measurement data // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1993. V. 33, Iss. 5. P. 725-740. DOI: 10.1016/0890-6955(93)90103-2

TECHNIQUE OF COMPENSATING ERRORS IN MACHINING OF PARTS WITH SCULPTURED SURFACES

©2016

V. A. Pechenin postgraduate student of the Department of Engine Production Technology, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, yadim.pechenin2011@yandex.ru

Machining of parts with sculptured surfaces using computer numerical control equipment and the control of their geometry is accomplished by 3D-models describing the master part. The article presents a technique of compensation of manufacturing errors, based on the incorporation of coordinate measuring of the part geometry in the machining process. The proposed technique involves changing of the machining program by restructuring 3D-model of the part according to the information on deviations obtained after the measurement. The technique allows the analysis of the measurement results and on-line correction of control programs for CNC metalworking equipment. The analysis of the measurement results consists in determining whether it is necessary to compensate the errors, and filtering the random error components not taken into account in compensation. Operational adjustment of control programs for metalworking equipment makes it possible to improve the quality of its products and the efficiency of production processes. The developed technique was implemented in the MATLAB application software package.

Machining of parts with sculptured surfaces; error compensation technique.

Citation: Pechenin V.A. Technique of compensating errors in machining of parts with sculptured surfaces. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 4. P. 252-264. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-252-264

References

1. Volosov S.S., Ped' E.I. *Pribory dlya avtomaticheskogo kontrolya v mashinostroenii* [Devices for automatic control in engineering]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1970. 310 p.
2. Mozgovoj V.F., Baluchok K.B., Kotov I.I., Panasenko V.A., Biruk M.K. Strategy of processing of blades monowhels on the processing centres CNC with variable 3D-correction. *Aerospace technic and technology*. 2013. No. 7 (104). P. 22-28. (In Russ.)
3. Postnov V.V., Malakhov E.N., Starovoitov S.V., Fedorovtsev A.Ju., Izmailova N.F. Computational and experimental method of machining blades for gas turbine engines on mechatronic machines with error compensation. *Vestnik UGATU*. 2012. V. 16, no. 7(52). P. 145-153. (In Russ.)
4. Volkov D.I., Koryazhkin A.A. Adaptive belt grinding of gas turbine engine blades at themulticoordinate machine-tool equipment. *Vestnik RGATU*. 2013. No. 1 (24). P. 42-48. (In Russ.)
5. Poniatowska M. Free-form surface machining error compensation applying 3D CAD machining pattern model. *Computer Aided Design*. 2015. V. 62. P. 227-235.
DOI: 10.1016/j.cad.2014.12.003
6. Rogers D.F., Adams J.A. *Mathematical Elements for Computer Graphics*. New York: McGra W-Hill Publishing Company, 1976. 239 p.
7. Rajamohan G., Shunmugam M.S., Samuel G.L. Effect of probe size and measurement strategies on assessment of freeform profile deviations using coordinate measuring machine. *Measurement*. 2011. V. 44, Iss. 5. P. 832-841.
DOI: 10.1016/j.measurement.2011.01.020
8. Moran P. Notes on Continuous Stochastic Phenomena. *Biometrika*. 1950. V. 37. Iss. 1/2. P. 17-23. DOI: 10.2307/2332142
9. Ufton G., Fingleton B. *Spatial data analysis by example categorical and directional data*. New York: Wiley, 1989. 432 p.
10. Fleishman S., Drori I., Cohen-Or D. Bilateral mesh denoising. *ACM Transactions on Graphics*. 2003. V. 22, Iss. 3. P. 950-953. DOI: 10.1145/882262.882368
11. Abdul-Rahman H.S., Jiang X.J., Scott P.J. Freeform surface filtering using the lifting wavelet transform. *Precision Engineering*. 2013. V. 37, Iss. 1. P. 187-202.
DOI: 10.1016/j.precisioneng.2012.08.002
12. Tomasi C., Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. 1998. P. 839-846.
DOI: 10.1109/ICCV.1998.710815
13. Eisemann E., Durand F. Flash photography enhancement via intrinsic relighting. *ACM Transactions on Graphics*. 2004. V. 23, no 1. P. 673-678.
DOI: 10.1145/1015706.1015778
14. Durand, F., Dorsey J. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images. *ACM Transactions on Graphics*. 2002. V. 21, Iss. 3. P. 257-266.
DOI: 10.1145/566654.566574
15. Sprael J.M., Linares J.M., Bachmann J., Bourdet P. Uncertainties in CMM measurements, Control of ISO specifications. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*. 2003. V. 52, Iss. 1. P. 423-426. DOI: 10.1016/s0007-8506(07)60616-7
16. De Boor C. *A Practical Guide to Splines (Revised Edition)*. New York: Springer, 2001. 348 p.
17. Yang B.-D., Menq C.-H. Compensation for form error of end-milled sculptured surfaces using discrete measurement data. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1993. V. 33, Iss. 5. P. 725-740. DOI: 10.1016/0890-6955(93)90103-2