

К оценке погрешности обработки деталей при интеллектуальном управлении станком***А. Ф. Лысенко, А. И. Изюмов, О. В. Гончаров**

Рассматриваются методы учёта влияния различных составляющих погрешностей технологической системы на процесс обработки для достижения требуемого качества изделия. Описана возможность реализации контроля наследуемых и оперативных факторов на основе использования интеллектуальных систем управления. Предлагается методика оценки геометрической точности детали, новизна которой заключается в анализе совокупного влияния факторов, что является более информативным по сравнению с оценкой влияния каждого из них. Представлен алгоритм программы расчёта функции распределения координат пути движения режущего инструмента, используемый для оценки попадания в допустимый диапазон. Приведён пример применения методики расчёта возможных погрешностей, в том числе, влияния отклонения фактической траектории режущего инструмента от заданной программой ЧПУ при обработке детали на многооперационном станке.

Ключевые слова: точность обработки деталей, совокупность составляющих погрешностей, интеллектуальное управление.

Введение. Общеизвестно, что точность обработки является важнейшей характеристикой любого технологического оборудования, в данном случае — металлорежущего станка с ЧПУ. Под точностью обработки понимают степень соответствия рассматриваемых параметров изготовленной детали к их теоретическим номинальным значениям. Как известно, повышение точности изготовления деталей увеличивает срок службы машин и оборудования. При недостаточной точности изготовления составляющих машину частей качество её функционирования будет невысоким и в процессе работы могут возникать существенные динамические нагрузки, которые приводят к ускоренному износу оборудования и его разрушению [1].

Причины возникновения погрешностей обработки на металлорежущих станках связаны с ошибками исполнения основных и вспомогательных движений, выполняемых станком, деформациями и износом узлов станка, используемых приспособлений и инструментов, а также с деформациями обрабатываемых на станках заготовок под действием усилий резания, температурных полей и др.

Существует ряд работ, посвящённых проблеме повышения точности механической обработки на станках. Над данной проблемой работали такие учёные в области технологии машиностроения и металлорежущих станков, как А. А. Маталин, В. Э. Пуш, Д. Н. Решетов, В. Т. Портман, В. А. Ратмиров, К. С. Колев, С. Хуанг, Р. Пигерт и др. Работы этих учёных заложили базу знаний для дальнейшего поиска путей повышения точности обработки на станках с ЧПУ.

Применение систем интеллектуального управления в металлообрабатывающих процессах связано, прежде всего, с тем, что дальнейшее повышение качественных характеристик оборудования невозможно без учёта большого количества факторов, параметров, многие из которых имеют случайный характер [2]. Решение этой задачи может быть найдено лишь при использовании интеллектуальных систем, способных находить решения в недетерминированных ситуациях при наличии стохастических процессов. База знаний такой интеллектуальной системы управления должна содержать в себе сведения обо всех проводимых ранее подобных операциях металлообработки и их результатов, на основе чего она формирует наилучший метод решения поставленной задачи [3–5].

Данная работа посвящена оценке влияния погрешностей технологической системы на погрешность механической обработки. При использовании такой оценки может быть обеспечена воз-

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

возможность достижения требуемого качества обработки, в том числе точности размеров и геометрической формы изделия.

Постановка задачи. Выполняется разработка методики аналитического расчёта отклонения траектории режущего инструмента в процессе резания и рассматривается её применение для анализа погрешностей обработки на многооперационных станках при использовании интеллектуальных систем управления. Практическое использование методики проиллюстрировано на основе имитационного моделирования процесса обработки поверхности.

Анализ совокупности составляющих погрешностей. Моделирование позволяет проанализировать то, как именно различные источники погрешностей обрабатывающей системы влияют на неточность готового изделия. Погрешности обработки будем классифицировать как наследуемые и оперативные. В то время как оперативные погрешности могут возникать в процессе обработки, наследуемые, в свою очередь, могут быть сведены к нулю [6].

Следовательно, необходимы модели изменения отдельных погрешностей и их влияния на суммарную погрешность операций механической обработки. Для создания модели используем совокупность (выборку) точек, расположенных на поверхности заготовки (рис. 1).

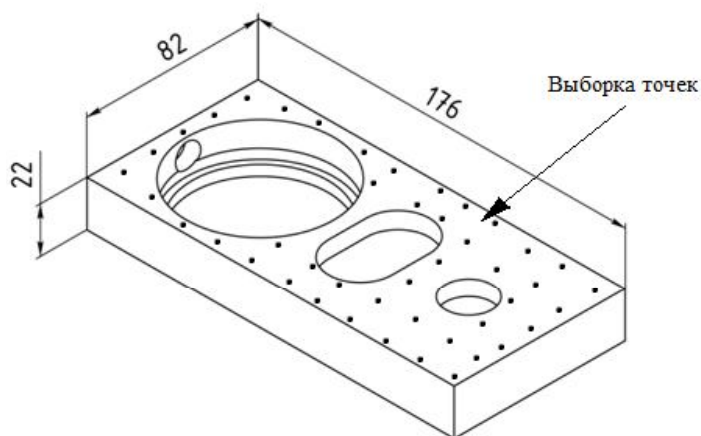


Рис. 1. Обрабатываемая заготовка и выборка точек на поверхности

Чтобы проиллюстрировать метод оценки погрешности, сложность модели погрешностей и количество составляющих погрешностей следует перейти от частных показателей к обобщённым (подвергнуть агрегации).

В качестве проагрегированных погрешностей рассматривается погрешность при закреплении заготовки и износ режущего инструмента [7]. На фрезерном станке система координат станка (СКС) совпадает с системой координат XYZ (рис. 2). Поверхность обрабатываемой детали необходимо установить в начало системы координат детали в качестве точки отсчёта СКС и системы координат заготовки (СКЗ). В ситуации идеального размещения СКС и СКЗ должны совпадать, если совпадают их начала координат и координатные оси. В связи с появлением погрешностей установки и погрешности положения базовой поверхности, СКЗ отклоняется от СКС, образуя систему координат $X'Y'Z'$ (рис. 2).

Предположим, что верхняя поверхность призматической детали, представленная на рис. 1, фрезеруется на глубину фрезерования t_p . Идеальное положение для обработанной плоскости описывается четырёхугольником $A-B-C-D$ (рис. 2).

В связи с погрешностями установки детали, неточностью приспособления, прижимной силой, СКЗ отклоняется от СКС, приводя к отклонению положения обработанной поверхности $A-B-C-D$. Предположим, что начало координат смещается в точку T_0 повёрнутую вокруг осей X , Y , Z на углы Θ_x , Θ_y , Θ_z соответственно.

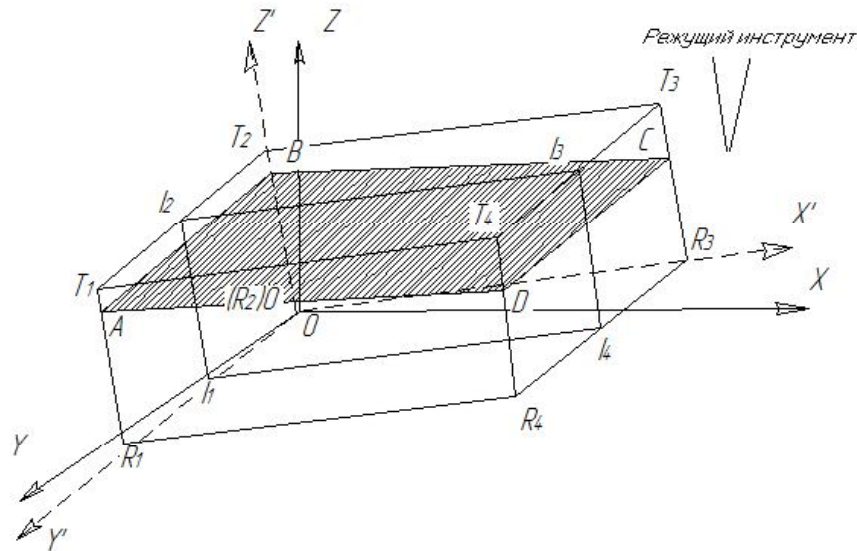


Рис. 2. Система координат $X'Y'Z'$, вызванная отклонением СКЗ от СКК

Для имитации случайного отклонения (в том числе вращения и смещения) в каждой моделируемой ситуации матрицы случайных значений перемещения и вращения задаются расстояниями a, b, c в трёх направлениях системы координат. Углы отклонений осей координат $\Theta_x, \Theta_y, \Theta_z$ формируются на основе точности установки заготовки. Преобразование координат между СКК и СКЗ может быть достигнуто с помощью следующих выражений:

$$T_t(a, b, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ a & b & c & 1 \end{bmatrix}, T_y(\Theta_y) = \begin{bmatrix} C_y & 0 & -S_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ S_y & 0 & C_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$C_i = \cos \Theta_i;$$

$$S_i = \sin \Theta_i;$$

$$i = x, y, z.$$

Представим износ режущего инструмента, как функцию от времени обработки t [8, 9]:

$$W = k \cdot t,$$

где k — коэффициент износа инструмента во времени, мм/с.

Время на обработку одной детали:

$$T_p = \frac{L_p}{V_f},$$

где V_f — подача; L_p — расстояние перемещения инструмента.

Предположим, что инструмент может произвести обработку n поверхностей перед тем, как будет заменён, вследствие износа до максимального допустимого $W_{\max}$ износа инструмента:

$$T_p \cdot n \leq \frac{W_{\max}}{k},$$

поэтому:

$$n \leq \frac{W_{\max}}{k \cdot T_p} = \frac{W_{\max} V_f}{k L_p}. \quad (2)$$

Пусть есть N точек обработанной поверхности, равномерно распределённых по направлению оси x . Погрешность обработки, вызванная износом инструмента, в j -й точке рассчитывается следующим образом [10]:

$$e_t = \frac{L_p}{V_f \cdot N} \cdot j \cdot k. \quad (3)$$

Предположим, что инструмент должен переместиться в точку (x, y, z) . В связи с погрешностью режущего инструмента, z -координатой этой точки может быть любое случайное значение в диапазоне $[z - e_m, z + e_m]$. Предположим, что эти случайные погрешности обработки подчиняются нормальному распределению со средним значением в диапазоне от 0 до 3σ , равным e_m , т. е.:

$$f(e_m) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-1}{2} \left(\frac{e_m - \mu}{\sigma} \right)^2}. \quad (4)$$

$P = \{p_1 \dots p_N\}$ обозначает множество точек N выборки, в которой $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ и $i = 1 \dots N$. В СКС z -координату реального пути инструмента при отсутствии других погрешностей, за исключением погрешности отклонения инструмента, вводят, обозначая как z_{0i} :

$$z_{0i} = H - a_p; (x_i, y_i) \in G(x, y) = 0. \quad (5)$$

Z -координата точки i с ошибкой при износе инструмента:

$$z_{ri} = z_{0i} + e_{ti}(t) = H - a_p + e_{ti}(t);$$

если погрешность РИ вызвана неточностью установки инструмента на станок:

$$z_{ri} = z_{0i} + e_{ti}(t) + e_{mi}(t) = H - a_p + e_{ti}(t) + e_{mi}(t);$$

в общем случае, когда учитываются погрешности некоторого числа M компонентов, связанные с процессом обработки или износом режущего инструмента, они могут быть выражены, как:

$$z_{ri} = z_{0i} + \sum_{j=1}^m e_{ji}(t). \quad (6)$$

Преобразованием этих точек из СКС в СКЗ, можно получить функцию точности путём сравнения z -координат этих точек (z_r) с z -координатами точек, расположенных на требуемой поверхности. Матрицы T_t, T_x, T_y, T_z могут быть вычислены из выражения (1).

$$[\ddot{x}_i \ddot{y}_i \ddot{z}_i 1] = [x_i y_i z_i 1] \cdot T_t(-a, -b, -c) \cdot T_x(-\theta_x) \cdot T_y(-\theta_y) \cdot T_z(-\theta_z) \quad (7)$$

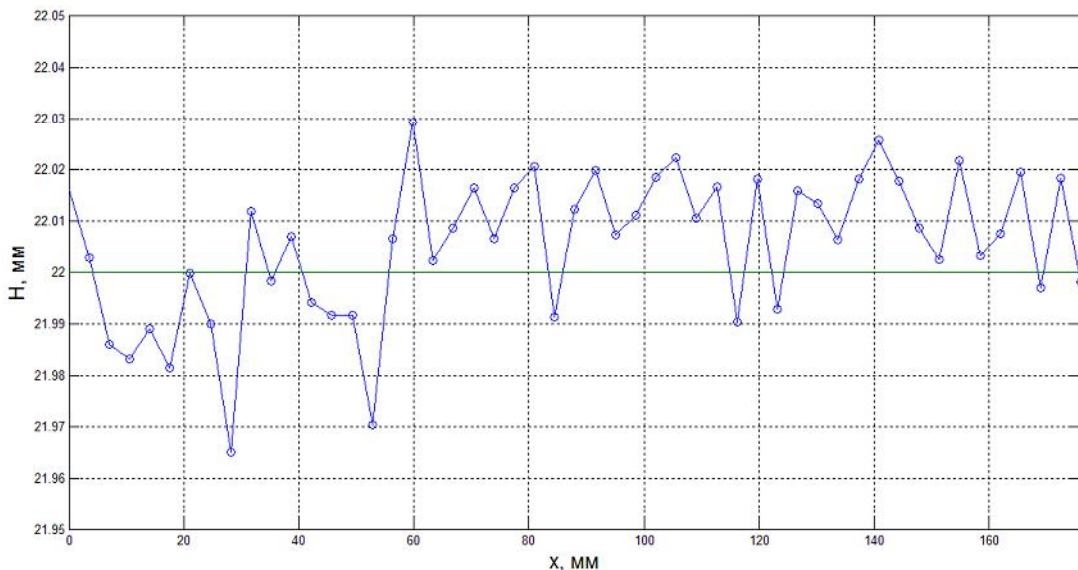


Рис. 3. Фактическая траектория инструмента с учётом его износа и погрешностей обработки

Алгоритм работы программы заключается в следующем:

1. Производится выборка точек обрабатываемой поверхности.
2. На основе исходных данных определяются оперативные погрешности (в данном случае погрешность износа) и наследуемые погрешности в каждой точке.
3. Производится расчёт фактических координат каждой точки с учётом матриц сдвига и поворота, полученных на основе исходных данных.
4. Полученные координаты точек используются для построения графика, отображающего реальную обработанную поверхность, который и является результатом работы программы.
5. Полученная функция распределения Z -координаты реального пути режущего инструмента, отражает вероятность попадания значения Z в определённый диапазон.

Из рис. 3 видно, что разброс значений Z -координаты реального пути режущего инструмента не превышает 0,04 мм, что является допустимым в условиях реального производства.

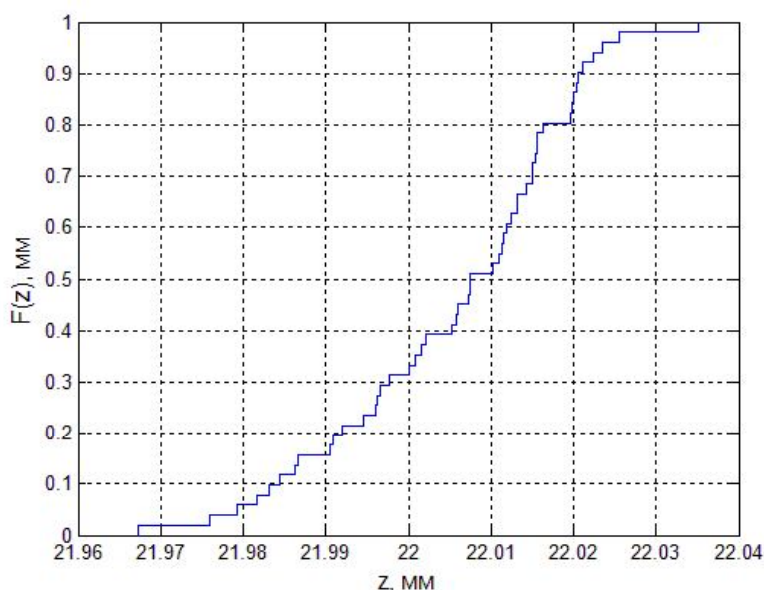


Рис. 4. Функция распределения Z -координаты фактической траектории режущего инструмента

Заключение. Предлагаемый в работе метод основан на анализе влияния отдельных погрешностей на суммарную в процессе механической обработки. В работе использован метод аналитического расчёта отклонения траектории режущего инструмента и рассмотрено его применение при оценке и анализе погрешностей обработки деталей на многооперационных станках. Проиллюстрировано практическое использование метода, приведён пример построения фактической траектории режущего инструмента с учётом его износа и погрешностей обработки. Представленная методика позволяет оценивать влияние погрешностей на процесс обработки и обеспечивает возможность предварительного контроля допуска для обрабатываемых поверхностей.

Библиографический список

1. Тугенгольд, А. К. Система управления станком, обеспечивающая повышенную точность обработки / А. К. Тугенгольд, Е. А. Лукьянов, В. А. Герасимов // СТИН. — 1999. — № 8. — С. 21–26.
2. Тугенгольд, А. К. Интеллектуальное управление мехатронными технологическими системами / А. К. Тугенгольд, Е. А. Лукьянов. — Ростов-на-Дону : Изд. центр Дон. гос. техн. ун-та, 2004. — 117 с.

3. Итоги и перспективы развития исследований в области интеллектуального управления мехатронными технологическими системами / А. К. Тугенгольд [и др.] // Вестн. Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — Т. 10, № 5. — С. 648–666.

4. Система интеллектуального управления станками / А. К. Тугенгольд [и др.] // СТИН. — 2008. — № 12. — С. 10–14.

5. Тугенгольд, А. К. Оценка ситуации и принятие решений интеллектуальной системой управления технологическим объектом / А. К. Тугенгольд // Вестн. Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — Т. 10, № 6. — С. 860–867.

6. Интеллектуальное электронное документирование технологических объектов в системе PLM / А. К. Тугенгольд [и др.] // Вестн. Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11, № 3. — С. 860–867.

7. Интеллектуальное управление технологическими системами / А. К. Тугенгольд [и др.] // СТИН. — 2008. — № 2. — С. 2–8.

8. Huang, S. H., Liu, Q., and Musa, R. Tolerance-based process plan evaluation using Monte Carlo simulation, *International Journal of Production Research*, 2004, vol. 42, no. 23, pp. 4871–4891.

9. Laperriere, L., ElMaraghy, H. Tolerance analysis and synthesis using jacobian-transforms. *CIRP-Annals*, 2000, vol. 49, no. 1, pp. 359–362.

10. Xu, N., Huang, S. H., Snyder, J. Systematic Investigation of Tool Wear Monitoring in Turning Operations. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, November 5–11, Orlando, USA, 2005, pp. 28–35.

Материал поступил в редакцию 26.02.2013.

References

1. Tugengold, A. K., Lukyanov, E. A., Gerasimov, V. A. Sistema upravleniya stankom, obeshchivayushchaya povyshennuyu tochnost obrabotki. [Machine control system providing high machining precision.] *STIN*, 1999, no. 8, pp. 21–26 (in Russian).

2. Tugengold, A. K., Lukyanov, E. A. Intellectualnoye upravleniye mekhatronnymi tekhnologicheskimi sistemami. [Intelligent control of mechatronic engineering systems.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2004, 117 p. (in Russian).

3. Tugengold, A. K., et al. Itogi i perspektivy razvitiya issledovaniy v oblasti intellektualnogo upravleniya mekhatronnymi tekhnologicheskimi sistemami. [Mechatronics technological systems intellectual management prospects and results.] *Vestnik of DSTU*, 2010, vol. 10, no. 5, pp. 648–666 (in Russian).

4. Tugengold, A. K., et al. Sistema intellektualnogo upravleniya stankami. [Intelligent control of machines.] *STIN*, 2008, no. 12, pp. 10–14 (in Russian).

5. Tugengold, A. K. Otsenka situatsii i prinyatiye resheniy intellektualnoy sistemoy upravleniya tekhnologicheskim ob'yektom. [Intellectual control system of the technological object: situation assessment and decision-making.] *Vestnik of DSTU*, 2010, vol. 10, no. 6, pp. 860–867 (in Russian).

6. Tugengold, A. K., et al. Intellectualnoye elektronnoye dokumentirovaniye tekhnologicheskikh ob'yektov v sisteme PLM. [Intellectual electronic documentation of technological objects in PLM system.] *Vestnik of DSTU*, 2011, vol. 11, no. 3, pp. 860–867 (in Russian).

7. Tugengold, A. K., Lukyanov, E. A., Remizov, E. V., Korotkov, O. E. Intellectualnoye upravleniye tekhnologicheskimi sistemami. [Intelligent control of engineering systems.] *STIN*, 2008, no. 2, pp. 2–8 (in Russian).

8. Huang, S. H., Liu, Q., and Musa, R., Tolerance-based process plan evaluation using Monte Carlo simulation, *International Journal of Production Research*, 2004, vol. 42, no. 23, pp. 4871–4891.

9. Laperriere, L., ElMaraghy, H. Tolerance analysis and synthesis using jacobian-transforms. CIRP-Annals, 2000, vol. 49, no. 1, pp. 359–362.

10. Xu, N., Huang, S. H., Snyder, J. Systematic Investigation of Tool Wear Monitoring in Turning Operations. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 5–11, Orlando, USA, 2005, pp. 28–35.

ON ESTIMATED ACCURACY OF PART CUTTING UNDER MACHINE INTELLIGENT CONTROL*

A. F. Lysenko, A. I. Izyumov, O. V. Goncharov

The effect of different methods of accounting error components of the engineering system on the treatment process to achieve the desired product quality is considered. The feasibility of the inherited and operational characteristic control based on the intelligent control systems is described. The technique of the part squareness estimate is offered. The novelty of the approach is in analyzing the effect of the combined characteristics that is more informative versus the effect estimate of each of them. An algorithm for the function calculation program of distributing the cutterpath coordinates used to evaluate entering the acceptable range is presented. An example of the probable error calculation procedure application including the effect of deviation of the tool actual trajectory from the CNC programmed one under part cutting on the multi-operation machine is provided.

Keywords: part cutting accuracy, component error population, intellectual control.

* The research is done within the frame of the independent R&D.