

Управление точностью металлорежущих станков. Структурно-параметрические методы

Часть 2*

Александр Кузнецов

Обоснована классификация моделей точности металлорежущих станков на три группы, характеризующиеся количеством и видом входящих составляющих, а также достигаемым результатом. Предложена схема выбора системы снижения, коррекции, компенсации и управления точностью станка, с учетом двух классов систем управления точностью.

Ключевые слова:

точность станка и детали, информационный и технологический образ изделия, система управления точностью станка

УДК 539.232 | ВАК 2.5.5

DOI: 10.22184/2499-9407.2022.27.2.48.56

В период 1960–1980 годов появились новые подходы в объяснении и формировании параметров и характеристик точности, их взаимосвязей и взаимовлияний на конечные выходные показатели:

- объемная точность (Matthias E.);
- векторный анализ объемной точности (Schultchik R.);
- вероятностная модель изменения точности станка во времени (Проников А. С.);
- метод координатных систем с деформируемыми связями (Базров Б. М.).

В 1980–2000 годах происходило дальнейшее развитие методов описания механизмов формирования выходных параметров точности станка, углубление знаний о взаимодействиях, взаимосвязях и взаимозависимостях между составляющими элементарных погрешностей:

- анализ составляющих погрешностей (Donaldson R.);
- вариационный метод расчета поведения станков (Решетов Д. Н., Портман В. Т.);

- геометрическое представление однородных преобразований координатных систем (Slocum A.);
- точность движений формообразования (shapegeneration) на основе однородных преобразований координатных систем (Moriwaki T., Sugimura N., Miao Y., Inasaki I., Kishinami K., Sakamoto S., Takeuchi Y., Tanaka F.);
- кинематика твердого тела (квазистатическая) и однородные преобразования координатных систем (Kiridena V. S. B., Okafor A. C., Ertekin Y. M.).

В 2000–2020 годах в дополнение к традиционным конструкторско-технологическим методам развивается повышение точности станков на основе применения систем коррекции и управления с использованием функциональных возможностей систем ЧПУ, на основе уже известных методов оценки точности, а также создание различных их модификаций:

- на основе теории нейронных сетей (Chen J., Yang H., Lee, Mize, Zeigert, Ramesh R.);
- на основе авторегрессионного анализа (Ni J.);
- на основе грей-систем (Wangetal);

* Начало см.: Станкоинструмент, 2022, № 1.

- на основе статистических методов повышения геометрической точности (Knapp W.);
- с использованием кубических полиномов для создания математической модели (Bohez E.L.J., Ariyajunya B., Sinlapeecheewa C., et al.) и др.

Продолжаются работы по созданию системных представлений о точности станков, методов их оценки, моделированию объемных геометрических и тепловых погрешностей на основе различных математических методов их описания:

- объемные ошибки не твердого (non-rigid) тела (Wang C., Svoboda O., Bach P., Liotto G.);
- объемные 3D-ошибки твердого и не твердого (non-rigid) тела (Mekid S., Jedrzejewski J., Kiong T.K., Wang C.);
- теория (MBS) кинематики многотельных систем (Schiehlen W.);
- метод (D-H) Денавита – Хартенберга (Lamikiz A., De La calle L.N.L., Ocerin O., et al.);
- структурная точность и точность образов, формируемых станком, на основе функций поля состояний (Кузнецов А. П.);
- экспоненциальная модель преобразования (PoE – product of exponential) геометрических ошибок станка для их интеграции (Fu G., Fu J., Xu Y., Chen Z.);
- модель общих смещений из-за погрешностей частей деталей станка и обрабатываемой детали в системах координат КИМ (Jie Gu, John S. Agariou, S. Kurgin);
- моделирование геометрических погрешностей и их компенсация с использованием винтовой теории (Moon S.K., Moon Y.M., Kota S., et al.).

В работах Q. Cheng, C. Wu, P.H. Gu, W.F. Chang and D.S. Xuan (2013), J. Yang, J. R. R. Mayer, Y. Altintas (2015), X. Zhong, H. Liu, H. Chang, B. Li (2018), S. Guo, S. Tang, D. Zhang (2019) также отмечается, что геометрические ошибки включают зависимость от позиции (положения) геометрические погрешности (position-dependent geometric errors – PDGEs) и независимые от позиции (положения) геометрические погрешности (position independent geometric errors – PIDGEs). Ошибки перпендикулярности (squareness) являются важными PIDGEs, влияющими на объемную ошибку в значительной степени. Измерения величины ошибки перпендикулярности обычно имеют низкую точность, учитывая общую погрешность моделирования и компенсации. PDGEs, такие как ошибки прямолинейности и угловые ошибки соответствующих осей, связаны с ошибками перпендикулярности или ошибками Аббе.

J. R. R. Mayer (2015–2021) предложил измерения в множестве точек с помощью расположенных на плоскости множества аттестованных шариков для проведения разнообразного анализа полученных результатов, в том числе методом Монте Карло с оценкой чувствительности к неопределенности параметров точности станка при пространственном расположении формообразующих узлов (рис. 5).

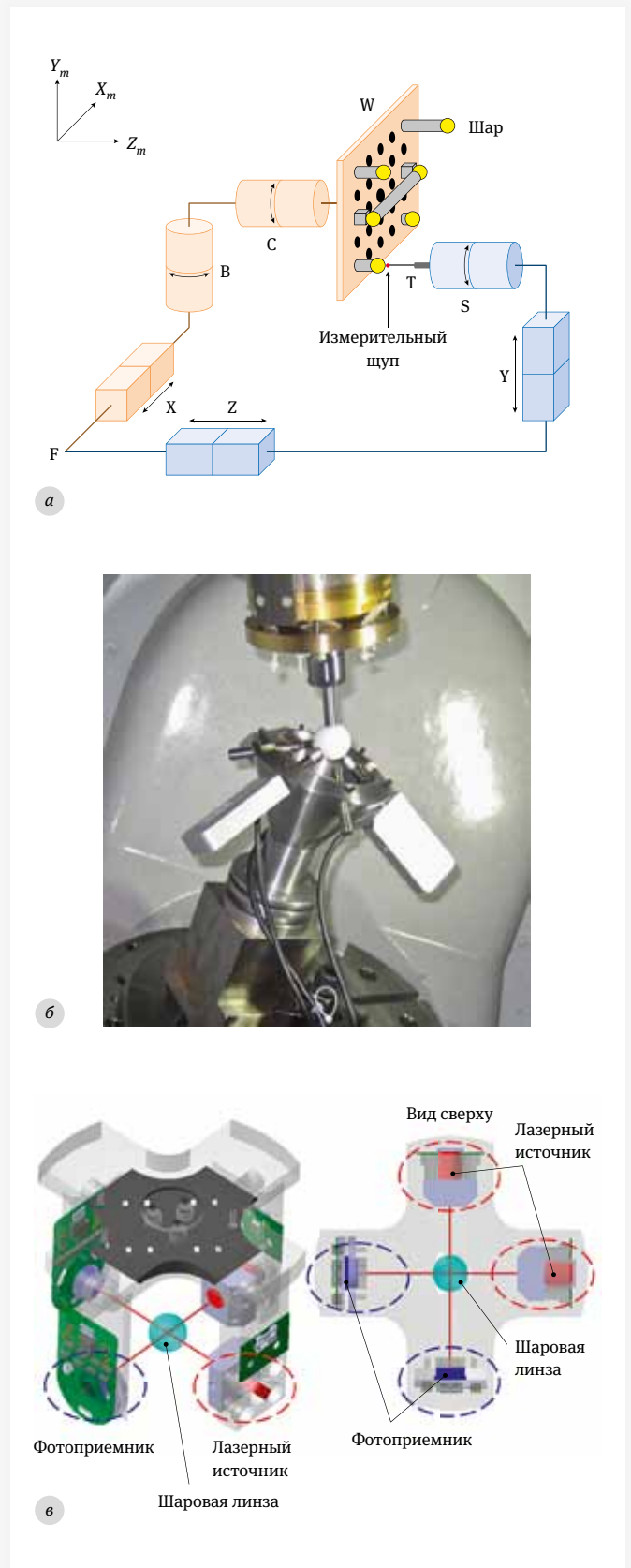


Рис. 5. Схема измерения: а – методом SAMBA [9]; б – методом R-теста [10]; в – методом лазерного R-теста [11]

Таблица 4. Характеристики положения и ориентация геометрических объектов

Геометрический объект	Точка $A_1(x_1, y_1, z_1)$	Линия $\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1}$	Плоскость $A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0;$ $\begin{cases} F_1(x, y, z) = 0; \\ F_2(x, y, z) = 0 \end{cases}$	Поверхность
Точка $A_2(x_2, y_2, z_2)$	Расстояние; вектор	Кратчайшее расстояние	Кратчайшее расстояние	Расстояние; вектор
Линия $\frac{x-x_2}{x_4-x_3} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1}$	Кратчайшее расстояние	Пересекающиеся; скрещивающиеся; параллельные	Ориентация; положение	Ориентация
Плоскость $A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0;$ $\begin{cases} F_3(x, y, z) = 0; \\ F_4(x, y, z) = 0 \end{cases}$	Расстояние; вектор	Ориентация; положение	Ориентация; положение	Ориентация; положение
Поверхность	Расстояние; вектор	Ориентация; положение	Ориентация; положение	Ориентация; положение

Примечание: Цветом выделены характеристики, которые в настоящее время применяются и стандартизированы.

Li D. Y., Li M. Q., Zhang G. B., Wang Y., Ran Y. (2015–2021) предложили анализ геометрической точности на основе FMA (Function-Motion-Action – Функция – Движитель – Действие) структуры станка.

Xing K., Rimpault X., Mayer J. R. R., Chatelain J.-F., Achiche S. (2021) предложили по результатам метода измерений SAMBA проводить анализ точности станка на основе применения фрактального анализа.

Таким образом, в процессе развития и накопления экспериментальных данных и исследований точности деталей, узлов и станков в целом в качестве мер оценок

рассматривают расстояния между различными геометрическими элементами твердых тел, которые принимаются для их характеристик (табл. 4), в системах координат или самих твердых тел (деталей, узлов станка), или иных координатных системах, что позволяет осуществлять переход элементов из одной системы в другую.

Однако следует отметить, что практически все методы оценки и управления точностью базируются на небольшом количестве математических методов преобразований координатных систем, зависимости и составляющие их элементы приведены в табл. 5.

Таблица 5. Методы преобразований координат в моделях оценок точности

Вид T преобразования	Аффинное – матрицы однородных преобразований (HTM)	Винтовое исчисление и матрица экспонент (PoE)	Метод Денавита – Хартенберга (D – H)
Перемещение (трансляция), T $T = T_x \cdot T_y \cdot T_z$	$T_x = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & a_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$	$T = e^{\hat{s}\theta} = \begin{pmatrix} I_{3 \times 3} & \vec{v} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ если $\ \omega\ = 0$	${}^{i-1}T_i = \begin{vmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$
Поворот (вращение), R $R = R_x \cdot R_y \cdot R_z$	$R_x = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_x & -\sin\alpha_x & 0 \\ 0 & \sin\alpha_x & \cos\alpha_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$	$T = e^{\hat{s}\theta} \left(e^{\hat{\omega}\theta} \left(I - e^{-\hat{\omega}\theta} \right) \cdot \frac{\omega \cdot v}{(\ \omega\ \theta)^2} + \frac{\omega\omega^T v}{(\ \omega\ \theta)^2} \right)$	${}^{i-1}T_i = \begin{vmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$
Оценка точности $\delta r = \delta r^{real} - \delta r^{idel}$	См. [5]	См. [15, 16]	См. [14]

Важно подчеркнуть, что все математические методы направлены на построение наиболее адекватной и точной геометрической модели погрешностей станка и основаны на преобразовании исходных данных, полученных путем экспериментальных измерений элементарных геометрических составляющих структуры погрешностей положения и движения деталей и узлов станка, а также путем их моделирования (см. рис. 1).

Рассмотрение методов моделирования и оценок точности станков показало, что многими авторами точность станка рассматривается как погрешность кинематической цепи формообразования станка и ее погрешность определяет точность δr как изменение радиус-вектора между точкой детали и точкой центра инструмента (TCP – Tool Center Point) и рассчитывается как последовательность произведения матриц однородных (аффинных) преобразований (НТМ размерности 4×4) координатных систем n подвижных элементов станка:

$$\delta r = T_{TCP}^{real} \cdot r - T_{TCP}^{ideal} \cdot r = \prod_{i=1}^n (T_i^R \cdot T_i^P)_{TCP}^{real} \cdot r - \prod_{i=1}^n (T_i^R \cdot T_i^P)_{TCP}^{ideal} \cdot r = \prod_{i=1}^n (ET_i^R \cdot ET_i^P)_{TCP}^{real} \cdot r,$$

где $T = T^R T^P = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, R и P – соответственно матрица

вращений (3×3) и трансляций (1×3) и их матрицы погрешностей ET_i^R и ET_i^P ; n – количество координатных систем в цепи «инструмент (TCP) ↔ деталь» (иногда также рассматриваются последовательные преобразования в системах «инструмент ↔ основание» и «основание ↔ деталь», а погрешность – как их разность).

Следует также отметить, что, в отличие от НТМ и традиционных применений метода Денавита – Хартенберга, теория винтового исчисления и РоЕ дает несколько преимуществ, включая моделирование сложных конфигураций станков с осями вращения, управляемость распространения ошибок, которая упрощает решение обратной кинематики и последующих процедур компенсации ошибок, функциональное представление ошибочных винтов в глобальной системе отсчета вместо нередко громоздких преобразований координат в локальной системе отсчета.

Функциональная структура станка и ее погрешность при формировании единичных геометрических образов будут иметь вид и могут быть определены как наибольшая разность их номинальных (заданных) и фактических (реальных) значений [2–4]:

$$\delta m_r = \text{Sup} \left\{ \left[\left(M_p \cdot B^\alpha \cdot M_\delta \right)_n \cdot \left(M_p \cdot B^\alpha \cdot M_\delta \right)_{n-1} \cdot \dots \cdot \left(M_p \cdot B^\alpha \cdot M_\delta \right)_1 \cdot m_r(\psi_2) \right]^p - \left[\left(M_p \cdot M_\delta \right)_n \cdot \left(M_p \cdot M_\delta \right)_{n-1} \cdot \dots \cdot \left(M_p \cdot M_\delta \right)_1 \cdot m_r(\psi_2) \right]^n \right\},$$

где n – количество узлов и деталей станка, участвующих и учитываемых в формировании единичного геометрического образа; $m_r(\psi_2)$ – матрица режущего инструмента; M_p и B^α – матрицы начальных положений и матрицы погрешности линейных и угловых положений; M_δ – обобщенная матрица движений.

Для точечного геометрического образа выражение может быть преобразовано для оценки точности взаимного относительного положения TCP – точка детали стола станка или лежащей на поверхности детали с учетом изменений положений квазистабильных связей в поле функции состояний твердых тел (деталей и узлов станка):

$$\delta r = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\prod_{i=1}^{n-(i+1)} M_i \right) \cdot K_i \cdot \delta r_i^0 + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\prod_{i=1}^{n-(i+1)} M_i \right) \cdot (B_i^\alpha)^* \cdot r_i + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\prod_{i=1}^{n-(i+1)} M_i \right) \cdot (B_i^\alpha)^* \cdot K_i \cdot \delta r_i^0,$$

где n – число квазистабильных связей; $i = n - 1$ – число структурных активных элементов станка; $\delta r = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix}^T$ – погрешность взаимного относительного положения

инструмента и детали; $\delta r_i^0 = \delta a_i = \begin{bmatrix} a_x & a_y & a_z & 1 \end{bmatrix}^T$ – линейные смещения структурных активных элементов в местах квазистабильных связей; K_i – коэффициент эквивалентной жесткости структурного активного элемента в местах квазистабильных связей; $M_i = M_{ip} = M_{ipx} \cdot M_{ipy} \cdot M_{ipz}$ – матрицы положений структурных активных элементов станка; $(B_i^\alpha)^* = B_i^\alpha - I$, (I – единичная матрица) – матрица угловых $\delta \alpha_{ix,y,z}$ деформаций (поворотов) структурных активных элементов станка:

$$B_i^\alpha - I = \begin{vmatrix} -\frac{\delta \alpha_y^2}{2} - \frac{\delta \alpha_z^2}{2} + \frac{\delta \alpha_y^2 \delta \alpha_z^2}{2} & -\left(1 - \frac{\delta \alpha_y^2}{2} \delta \alpha_z\right) & -\delta \alpha_y & 0 \\ -\delta \alpha_x \delta \alpha_y \left(1 - \frac{\delta \alpha_z^2}{2}\right) + \left(1 - \frac{\delta \alpha_x^2}{2}\right) \delta \alpha_z & -\frac{\delta \alpha_y^2}{2} - \frac{\delta \alpha_z^2}{2} - \delta \alpha_x \delta \alpha_y \delta \alpha_z + \frac{\delta \alpha_y^2 \delta \alpha_z^2}{2} & -\delta \alpha_x \left(1 - \frac{\delta \alpha_y^2}{2}\right) & 0 \\ \delta \alpha_y \left(1 - \frac{\delta \alpha_x^2}{2}\right) + \left(1 - \frac{\delta \alpha_z^2}{2}\right) \delta \alpha_x & -\delta \alpha_y \delta \alpha_z \left(1 - \frac{\delta \alpha_x^2}{2}\right) + \delta \alpha_x \left(1 - \frac{\delta \alpha_z^2}{2}\right) & -\frac{\delta \alpha_x^2}{2} - \frac{\delta \alpha_y^2}{2} + \frac{\delta \alpha_x^2 \delta \alpha_y^2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

а погрешности положения, движения и состояния, например проекции в направлении OX могут быть определены [4]:

$$\begin{aligned} \delta\alpha_x = & (\delta\alpha_{xx} + \delta\alpha_{xy} + \delta\alpha_{xz}) = \delta_x(X) + \delta_x(Y) + \delta_x(Z) + \delta_x^y(X)Y + P_x(X) + \\ & + \delta_x^z(X)Z + \delta_x^y(Y)X + \delta_x^z(Y)Z + \delta_x^y(Z)Y + \delta_x^z(Z)X + S_x(Y) + S_x(Z) + \\ & + \delta_x(P_x) + \delta_x(P_y) + \delta_x(P_z) + \delta_x^y(P_x)Y + \delta_x^z(P_x)Z + \delta_x^y(P_y)X + \delta_x^z(P_y)Z + \\ & + \delta_x^y(P_z)Y + \delta_x^z(P_z)X + \delta_x(P_x^G) + \delta_x^y(P_x^G)Y + \delta_x^z(P_x^G)X + \\ & + \delta_x(T_x^*) + \delta_x(T_y^*) + \delta_x(T_z^*) + \delta_x^y(T_x^*)Y + \delta_x^z(T_x^*)Z + \delta_x^y(T_y^*)X + \delta_x^z(T_y^*)Z + \\ & + \delta_x^y(T_z^*)Y + \delta_x^z(T_z^*)X + \delta_x(XT) + \delta_x(ZT) + \delta_x^y(XT)Y + \\ & + \delta_x^z(XT)Z + \delta_x^y(YT)X + \delta_x^z(YT)Z + \delta_x^y(ZT)Y + \delta_x^z(ZT)X + a_{xx}(\tau). \end{aligned}$$

Таким образом, рассмотрение моделей точности металлорежущих станков может быть приведено и классифицировано в виде трех групп, характеризующихся количеством и видом входящих составляющих, которые определяют и обуславливают характер зависимости и, следовательно, модель и возможности, а также результат, достигаемый соответствующей системой управления точностью. Возможны три вида групп систем воздействия на точность:

- линейная модель, которая рассматривает точность металлорежущих станков как линейную связь выходного параметра δr и линейных начальных погрешностей положения (смещения, деформаций) элементов станка в местах квазистабильных структурных связей элементов модели станка;
- нелинейная модель, которая рассматривает точность металлорежущих станков как линейную связь выходного параметра δr и линейных начальных погрешностей положения (смещения, деформаций) элементов станка в местах квазистабильных структурных связей элементов модели станка, линейных и угловых погрешностей движения в поле функции их пространственных состояний;
- нелинейная модель, которая рассматривает точность металлорежущих станков как линейную связь выходного параметра δr и линейных начальных погрешностей положения (смещения, деформаций) элементов станка в местах квазистабильных структурных связей элементов модели станка, линейных и угловых погрешностей движения в поле функции их состояний.

Следовательно, исходя из представленной схемы управления точностью станка (см. рис. 1) и моделей формирования и оценки показателей точности станка, можно предложить таблицу выбора из более 100 возможных вариантов и схем снижения, коррекции, компенсации и управления точностью станка. При этом необходимо иметь в виду два принципиально разных класса систем:

1. **структурные системы управления**, которые обусловлены и определяются воздействием на один или большее количество структурных параметров и активных элементов модели формирования

результатирующей величины взаимного относительного перемещения (линейного или углового) выходных взаимодействующих (инструмент – деталь) элементов металлорежущих станков;

2. **программные автоматизированные системы управления**, которые обусловлены и определяются дополнительным воздействием не на структурные параметры активных элементов модели формирования результирующей величины взаимного относительного перемещения (линейного или углового), а на конечные, управляемые системой ЧПУ металлорежущих станков (или наиболее значимые, создающие размеры при формообразовании) элементы станка (и/или дополнительные интегрированные в станок) и рабочие органы, обуславливающие и определяющие их взаимное относительное положение и/или перемещение:
 - программные системы управления положением активных элементов и их квазистабильных связей;
 - программные системы управления состоянием (температурным и/или термоупругим, упругим, диссипативным) активных элементов и/или квазистабильных связей.

На основании методологии построения систем управления точностью станка (см. рис. 1), математической модели оценки точности станка (см. табл. 5), характеристики положения, движения или состояния деталей и узлов металлорежущих станков (см. табл. 1), количества и видов соответствующих элементов погрешностей по причине их возникновения и исходя из условия $\delta r \Rightarrow 0$ можно сформировать структуру требуемой системы управления точностью и представить ее в виде структурного кода (табл. 6). Код структуры управления состоит из двух частей, разделенных точкой: слева от точки указан порядковый номер метода воздействия (1 – снижение, 2 – коррекция, 3 – компенсация, 4 – управление), а справа от точки указан порядковый номер вида погрешности (1 – погрешность положения, 2 – погрешность движения, 3 – погрешность состояния). Значение «и» указывает на единичный характер воздействия, а «или» – на комплексный. При комплексном методе воздействия слева от точки указаны сочетания видов (12 – снижение и коррекция), а справа – сочетание объекта воздействия (12 – погрешности положения и движения, или 123 – погрешности и положения и движения и состояния). Детальное построение системы может быть также дополнительно описано путем классификации элементов рассмотрения как самих видов воздействия, так и объектов воздействия, что очевидно не меняет суть самой системы управления, а только детализирует элементы такой системы. Таким образом, количество структур построения систем управления точностью составляет 109, а количество их разновидностей реализации определяется количеством элементов видов N и объектов K воздействия и может достигать значений, равных $109 \times N \times K$.

ASTANA Powerexpo

9-я КАЗАХСТАНСКАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА

ЭНЕРГЕТИКА

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ



2022
25-27 мая

МВЦ "Евро",
Нур-Султан, Казахстан

www.POWEREXPOASTANA.kz



ВНЭ



СВЕТОТЕХНИКА



КАБЕЛЬ И ПРОВОД



ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

ОРГАНИЗАТОРЫ:



+7 727 258 34 34, E-mail: power@iteca.kz



Торговое представительство
Российской Федерации
в Казахстане

Таблица 6. Схема формирования структуры различного вида систем управления точностью станка

Функциональное требование к системе управления точностью		Погрешности Положения, 1		Погрешности Движение, 2			Погрешности Состояние, 3	
		ИЛИ			И			
Снижение, 1	ИЛИ	1.1	1.2	1.3	1.12	1.13	1.23	1.123
		–	2.2	2.3	2.12	2.13	2.23	2.123
		–	–	3.3	3.12	3.13	3.23	3.123
		4.1	4.2	4.3	4.12	4.13	4.23	4.123
Коррекция, 2	И	12.1	12.2	12.3	12.12	12.13	12.23	12.123
		123.1	123.2	123.3	123.12	123.13	123.23	123.123
		1234.1	1234.2	1234.3	1234.12	1234.13	1234.23	1234.123
		13.1	13.2	13.3	13.12	13.13	13.23	13.123
Компенсация, 3	И	134.1	134.2	134.3	134.12	134.13	134.23	134.123
		14.1	14.2	14.3	14.12	14.13	14.23	14.123
		124.1	124.2	124.3	124.12	124.13	124.23	124.123
		14.1	14.2	14.3	14.12	14.13	14.23	14.123
Управление, 4	И	23.1	23.2	23.3	23.12	23.13	23.23	23.123
		234.1	234.2	234.3	234.12	234.13	234.23	234.123
		24.1	24.2	24.3	24.12	24.13	24.23	24.123
		34.1	34.2	34.3	34.12	34.13	34.23	34.123

Таблица 7. Виды компенсации по ГОСТ 16907-2018

№ п / п	Наименование вида компенсации
1	Физическая компенсация ошибки в функциональной ориентации по осям вращения
2	Компенсация угловой погрешности перемещений линейных осей в трехмерном положении функциональной точки в рабочем объеме
3	Компенсация ошибок позиционирования линейных осей вдоль заданных траекторий
4	Компенсация специальной геометрии станка для линейных осей
5	Квадратная компенсация ошибки прямоугольности между осями линейного перемещения на определенных линиях
6	Компенсация погрешности прямолинейности линейных осей вдоль заданных траекторий
7	Объемная компенсация погрешностей линейных осей
8	Объемная компенсация линейных осей, включая функциональную ориентацию
9	Компенсация угловой погрешности перемещений осей вращения в трехмерном положении функциональной точки в рабочем объеме
10	Компенсация ошибок положения и ориентации осей вращения
11	Компенсация ошибки углового позиционирования оси вращения
12	Компенсация радиальной и осевой погрешности перемещения осей вращения
13	Компенсация геометрии вращающихся осей для специального станка
14	Объемная компенсация для ошибок оси вращения
15	Объемная компенсация ошибок поворотных осей, включая функциональную ориентацию

Международная
выставка инструмента
International tool expo

mitex™

МОСКВА, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»
EXPOCENTRE FAIRGROUNDS, MOSCOW

ПОЛУЧИТЬ БИЛЕТ



| 8-11 НОЯБРЯ
NOVEMBER 2022

Организатор

МЕЖДУНАРОДНОЕ АССОЦИАЦИОННОЕ ОБЩЕСТВО
ЕВРОЭКСПО

МЕЖДУНАРОДНОЕ АССОЦИАЦИОННОЕ ОБЩЕСТВО
ЕВРОЭКСПО

При поддержке

ЭКСПОЦЕНТР



Стратегический партнер

Ассоциация туровых компаний
и профессионалов индустрии
в сфере услуг путешествий

РАТНЭ



Информационные партнеры

ПОТРЕБИТЕЛЬ

www.master-forum.ru

МИР
ИНСТРУМЕНТА

КОМПОЗИТ
XXI ВЕК

Интернет-партнер

MASTER-FORUM.RU

mitexpo.ru



Оценку охвата предлагаемых возможных 15 видов компенсации в соответствии со стандартом ГОСТ 16907-2018 по отношению к максимально реализуемым (см. табл. 6) можно провести путем несложного сравнения с обобщением видов по стандарту, приведенных в табл. 7.

Таким образом, прогресс в развитии техники и информационных технологий позволил перейти от системы обеспечения и управления параметрами точности станка только на уровне проектирования и изготовления, что имело как технические, так и экономические ограничения, на уровень управления, когда под модель точности станка и ее элементов разрабатываются схемы управления с использованием существующей структуры и элементов (модулей движения / положения) станка, когда управление их движением / положением / состоянием позволяет дополнять и / или изменять их заданные параметры и свойства исходя из взаимодействия, взаимовлияния и взаимодополнения в соответствии с математической моделью отображения характеристик одних элементов в системе движением / положением / состоянием других. При этом могут использоваться или не использоваться сенсоры исходной информации для модели точности в процессе работы станка. Применяются системы обучения станков «правильной» работе по исходной информации, полученной в процессе предварительных испытаний станков и их корректировка при эксплуатации. Наиболее распространенными системами в настоящее время стали системы управления геометрической точностью и температурным изменением состояния станка, которые занимают от 40 до 70% доли влияния на выходной показатель его точности. Перед исследователями стоит широкий спектр задач по созданию адекватных моделей точности в режиме реального времени работы станка. Очевидно также, что типовые методологии и модели точности станков требуют привязки к конкретным моделям и типам станков для наиболее эффективной реализации даже известных решений.

Литература

1. **Кузнецов А. П.** Структуры процессов и оборудования обработки резанием. Ч. 4. Структуры оборудования обработки резанием // Вестник Машиностроения. 2015. № 5. С. 63–77.
2. **Пронилов А. С., Стародубов В. С., Кузнецов А. П.** Методические указания 1-я редакция. Надежность в технике. Технологические системы. Расчет и оценка показателей параметрической надежности технологического оборудования с ЧПУ. М.: ВНИИНМАШ ГОССТАНДАРТ СССР, 1980. 114 с.
3. **Кузнецов А. П.** Методы оценки и контроля качества металлорежущих станков с ЧПУ. М.: ВНИИТЭМР, 1985. 68 с.
4. **Кузнецов А. П.** Тепловое поведение и точность металлорежущих станков. М.: Янус-К, 2011. 256 с.
5. **Portman V., Inasaki I., Sakakura M. and Iwatate M.** (1998) Form-Shaping System of Machine Tools: Theory and Applications. *Annals of the CIRP*, 47, 1998, 329–332.
6. **Portman V. T.** Mechanics of accuracy in Engineering design of Machines and Robots. Volume 1. Nominal functioning and geometric accuracy. ASME Press. 2018. 470 p.
7. **Кузнецов А. П.** Эволюция методов оценки точности металлорежущих станков и тенденции ее изменения. Ч. 1. Эволюция понятия точность и ее физическая модель // Вестник машиностроения. 2016. № 12. С. 8–16.
8. **Кузнецов А. П.** Эволюция методов оценки точности металлорежущих станков и тенденции ее изменения. Ч. 2. Эволюция понятий и моделей оценок точности металлорежущих станков и тенденции ее изменения // Вестник машиностроения. 2017. № 8. С. 22–35.
9. **Sepahi-Boroujeni S., Mayer J. R. R., Khameneifar F.** Efficient uncertainty estimation of indirectly measured geometric errors of five-axis machine tools via Monte-Carlo validated GUM framework. *Precision Engineering*, 67, 2021. PP. 160–171.
10. **Ibaraki S., Hong C., Oyama C.** Construction of an error map of rotary axes by static R-test, *Proc. of the 6th Int. Conf. on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21)*, 2011.
11. **Tran C.-S., Hsieh T.-H., Jywe W.-Y.** Laser R-Test for Angular Positioning Calibration and Compensation of the Five-Axis Machine Tools. *Appl. Sci.* 2021, 11, 9507. PP. 2–21. <https://doi.org/10.3390/app11209507>
12. **Fan K.-C., Huang Z.-N., Li K.-Y.** Real-time compensation of Abbe errors on machine tools. *The 17th International Conference on Mechatronics Technology*, 2013. PP. 67–70.
13. **Fan K.-C., Yen H.-M., Li K.-Y.** A New Concept of Volumetric Error Analysis of Machine Tools. Based on Abbé Principle. *The 3rd International Conference on Design Engineering and Science, ICDES 2014*. PP. 198–202.
14. **Ramos P. B., Medina J. M., Salcedo M. C., Peña A. R.** Application of the Denavit – Hartenberg Method to Estimate the Positioning Errors of an Automated XYZ Cartesian Table. *Contemporary Engineering Sciences*. 2018. Vol. 11. No. 70. PP. 3483–3493. <https://doi.org/10.12988/ces.2018.86293>
15. **Cheng Q., Sun B., Liu Z., Feng Q., Gu P.** Geometric error compensation method based on Floyd algorithm and product of exponential screw theory. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture. J Engineering Manufacture*. 232(7), 2018. PP. 1157–1171. <https://doi.org/10.1177/0954405416663537>
16. **Fu G., Fu J., Xu Y., Chen Z.** Product of exponential model for geometric error integration of multi-axis machine tools. *Int J Adv Manuf Technol*. 2014. No. 71. PP. 1653–1667. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5586-5>

Автор

Кузнецов Александр Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры станков МГТУ «СТАНКИН»

07-09
июня 2022

Москва
ЦВК «Экспоцентр»
Павильон 8



При поддержке:

АРСС

Ассоциация развития
стального строительства



Российский союз
поставщиков
металлопродукции

7-я Международная
специализированная выставка

Металло Конструкции 2022



12+

Место проведения:



Генеральный
информационный партнер:



Организатор:



www.mc-expo.ru

+7 (495) 734-99-66