

**Ключевые слова:**

структурная точность станка, линейные и угловые параметры положения, геометрическая погрешность, координатная система, матрица положений

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ТОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ: КОМПЕНСАЦИЯ, КОРРЕКЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

ЧАСТЬ 2

Александр КУЗНЕЦОВ

Рассмотрены вопросы структурной точности металлорежущих станков. Представлены структурные составляющие линейных и угловых геометрических погрешностей металлорежущих станков. Представлены три группы моделей точности металлорежущих станков, различающихся количеством и видом входящих составляющих, а также результатом, достигаемым созданной на их базе системой управления точностью.

Структурная точность металлорежущих станков – упорядоченное множество линейных и угловых смещений подвижных (и неподвижных) деталей и узлов металлорежущего станка, обусловленных изменением их поля состояний (пространственного, энергетического, силового, теплового, гравитационного, временного) и приводящих к изменению свойств номинальных (идеальных) единичных геометрических образов, формируемых металлорежущим станком.

В табл. 1 приведены структурные составляющие геометрических погрешностей металлорежущих станков.

В левом столбце обозначено шесть возможных видов движений – как линейных, так и вращательных. Вертикальные столбцы описывают возможные погрешности в направлении координатной оси: как линейной, так и трех возможных погрешностей вращения вокруг указанной оси.

Правая часть структуры отображает движения детали и инструмента (в том числе и движение инструмента, обеспечивающее только процесс резания, если оно не совпадает с иными его движениями) с указанием линейных и угловых параметров положения осей перемещения друг относительно друга, а также пло-

скости, в которой происходит движение в соответствующем направлении. На пересечении соответствующих горизонтальных и вертикальных столбцов указаны погрешности, которые соответствуют принятой координатной структуре металлорежущего станка.

Таблица 1. Структурные составляющие геометрической точности станка

| Движение по осям координат | Ось x и ее углы поворота | | | |
|----------------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | x | $a_x(X)$ | $a_y(X)$ | $a_z(X)$ |
| x | $\delta_x(X)$ | P_{xx} | $\delta a_y(X)$ | $\delta a_z(X)$ |
| y | $\delta_x(Y)$ | $\delta a_x(X)$ | – | $S_{yx}(Y)$ |
| z | $\delta_x(Z)$ | – | $S_{zx}(Z)$ | – |
| $\omega_x(X)$ | $\delta_x[\omega_x(X)]$ | $\omega_x(X)$ | $\delta a_y(X)$ | $\delta a_z(X)$ |
| $\omega_y(Y)$ | $\delta_x[\omega_y(Y)]$ | $\delta a_x(X)$ | – | S_{yx} |
| $\omega_z(Z)$ | $\delta_x[\omega_z(Z)]$ | – | S_{zx} | – |

Примечание:

P_{ij} – непараллельность осей ij ;

S_{ij} – неперпендикулярность осей ij ;

* Продолжение. Начало см.: СТАНКОИНСТРУМЕНТ, 2020, № 1, с. 40.

Таким образом, металлорежущему станку с заданной координатной формулой присуща структура погрешностей, ограниченная границей их выбора, находящейся на пересечении горизонталей X, Y, Z и вертикальных столбцов осей погрешностей X, Y, Z, и, соответственно, состоит из 24 погрешностей. Следовательно, в общем виде структура как линейных, так и угловых погрешностей

может быть представлена в единой структурной форме описания.

Базовые положения как руководство по описанию и измерению геометрических погрешностей (ошибок) в станках документируются в стандартах Международной организации по стандартизации (ISO) 230 серии (1996, 1998, 2010, 2012 гг.) и Американского общества инженеров-механиков (ASME)

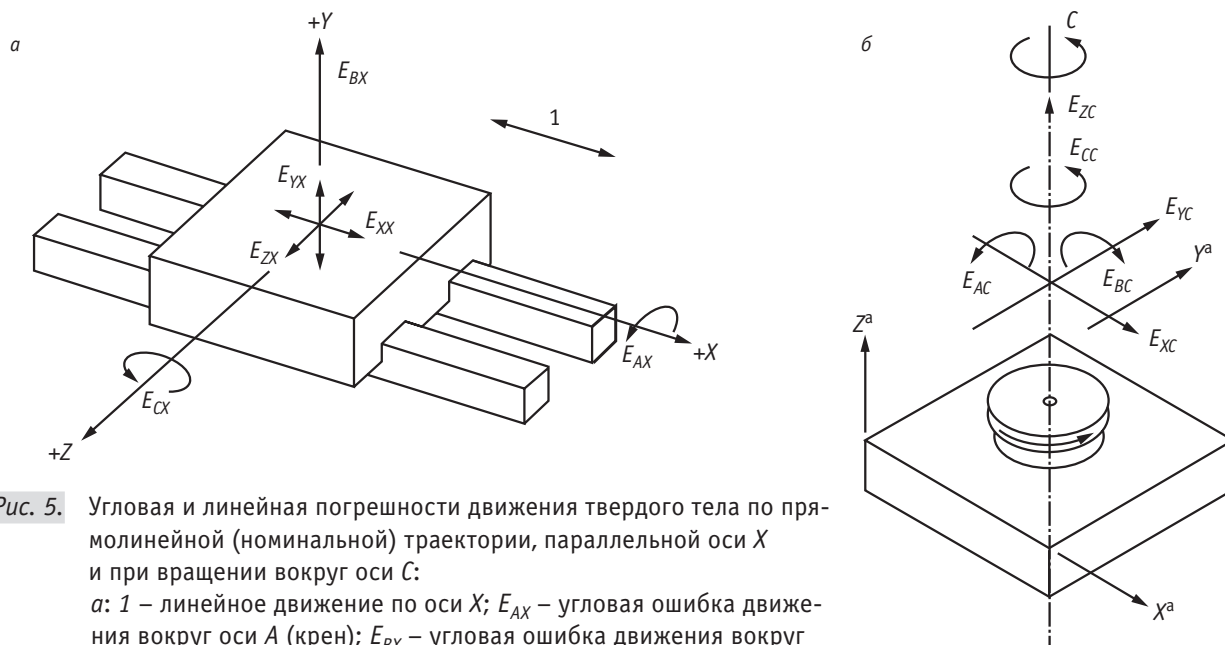


Рис. 5. Угловая и линейная погрешности движения твердого тела по прямой (номинальной) траектории, параллельной оси X и при вращении вокруг оси C:

а: 1 – линейное движение по оси X; E_{Ax} – угловая ошибка движения вокруг оси A (крен); E_{Bx} – угловая ошибка движения вокруг оси B (рыскание); E_{Cx} – угловая ошибка движения вокруг оси C (тангаж); E_{Xx} – линейная ошибка позиционирования при движении по оси X, отклонения позиционирования оси X; E_{Yx} – ошибка прямолинейности движения в направлении оси Y; E_{Zx} – ошибка прямолинейности движения в направлении оси Z;

б: E_{Xc} – радиальная ошибка перемещения оси C в направлении X; E_{Yc} – радиальная ошибка перемещения оси C в направлении Y; E_{Zc} – ошибка осевого смещения оси C; E_{Ac} – ошибка угла наклона оси C вокруг оси X; E_{Bc} – ошибка угла наклона оси C вокруг оси Y; E_{Cc} – угловая ошибка позиционирования вращения вокруг оси C; C – измеренные угловые отклонения позиционирования оси C

| Ось y и ее углы поворота | | | | Ось z и ее углы поворота | | | | Деталь | Положение Инструмент | Положение Резание | | |
|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|----------------------|-------------------|---|---|
| y | $a_x(Y)$ | $a_y(Y)$ | $a_z(Y)$ | z | $a_x(Z)$ | $a_y(X)$ | $a_z(Z)$ | | | | | |
| $\delta_y(X)$ | - | - | - | $\delta_z(X)$ | - | - | - | x/x0y | a | 0 | d | 0 |
| $\delta_y(Y)$ | $\delta a_x(Y)$ | P_{yy} | $\delta a_z(Y)$ | $\delta_z(Y)$ | - | - | $\delta a_z(Z)$ | y/x0y | b | 0 | e | 0 |
| $\delta_y(Z)$ | S_{zy} | $\delta a_y(Y)$ | - | $\delta_z(Z)$ | $\delta a_x(Z)$ | $\delta a_y(X)$ | P_{-zz} | 0 | c | z/z0x | f | 0 |
| $\delta_y[\omega_x(X)]$ | - | - | S_{xy} | $\delta_z[\omega_x(X)]$ | - | S_{xz} | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $\delta_y[\omega_y(Y)]$ | $\delta a_x(Y)$ | $\omega_y(Y)$ | $\delta a_z(Y)$ | $\delta_z[\omega_y(Y)]$ | S_{yz} | - | $\delta a_z(Z)$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $\delta_y[\omega_z(Z)]$ | S_{zy} | $\delta a_y(Y)$ | - | $\delta_z[\omega_z(Z)]$ | $\delta a_x(Z)$ | $\delta a_y(X)$ | $\omega_z(Z)$ | 0 | 0 | 0 | | 1 |

$\delta_i(j)$ – погрешность в направлении i при движении по j;
 $\delta a_i(j)$ – угловая погрешность от вращения вокруг i при движении по j;

x0y – координатная плоскость;
a, b, c, d, e, f – расстояние между координатными системами.

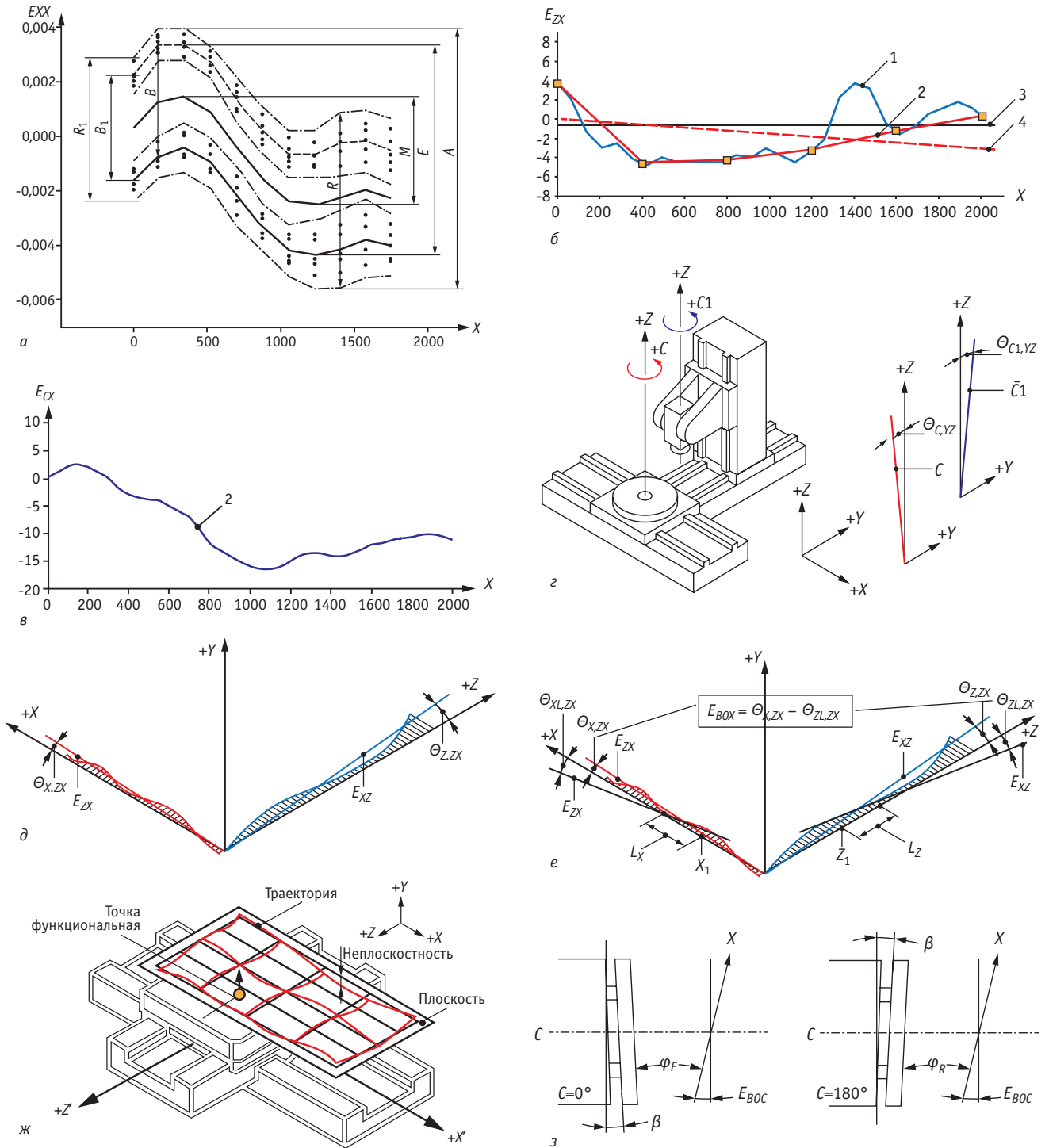


Рис. 6. Графическое изображение измеренных элементарных геометрических ошибок: а – точность позиционирования (ИСО 230-2); б – прямолинейность перемещения; в – угловые погрешности; г – непараллельность осей; д – неперпендикулярность осей; е – общая и локальная неперпендикулярность осей; ж – неплоскостность перемещения; з – непараллельность плоскости и оси

В5.54. серии (1992, 2005 гг.). На рис. 5 приведена иллюстрация геометрических погрешностей и их обозначений в соответствии с ИСО 230-1, а на рис. 6 даны графические изображения измеренных элементарных геометрических ошибок.

Максимально допустимые значения и допуски на отклонения геометрических погрешностей и методы их контроля установлены в стандартах ISO 10791 серии (1998, 2001 гг.) под общим наименованием «Методы контроля обрабатывающих цен-

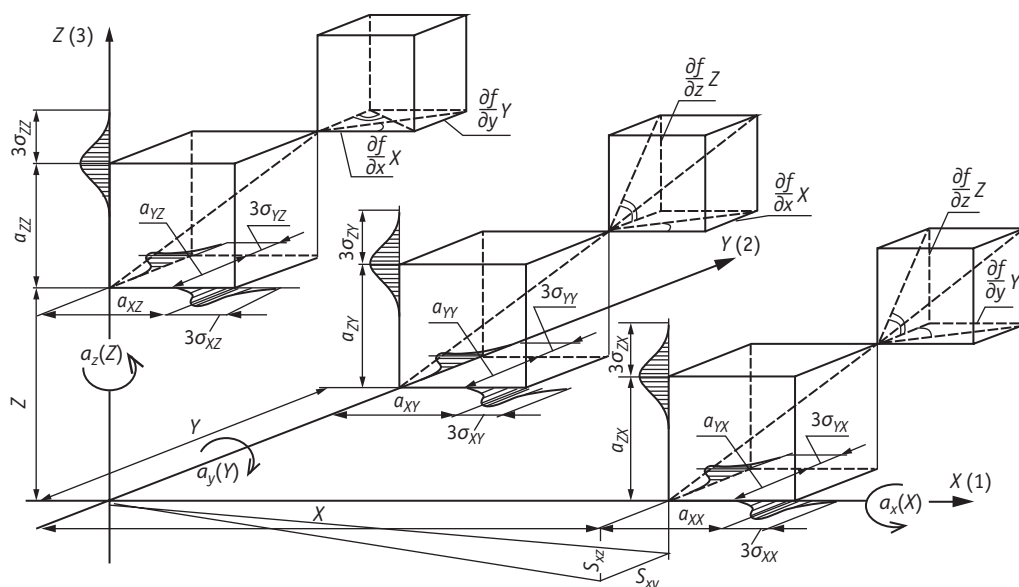


Рис. 7. Геометрическая модель объемной точности станка

тров» и ISO 13041 серии (2004–2015 гг.) – для токарных центров и токарных станков с ЧПУ.

Геометрическая модель объемной точности станка приведена на рис. 7, где представлены как систематические a_{ij} , так и случайные σ_{ij} составляющие вектора геометрических ошибок по каждой оси координат, а также угловые погрешности функции пространственных положений $\frac{\partial f(XY,Z)}{\partial i}$.

Рассмотрение методов моделирования и оценок точности станков показало, что авторы часто определяют точность δE как изменение радиус-вектора между точкой детали и точкой центра инструмента (ТСП – Tool Center Point) и рассчитывают как последовательность произведения матриц однородных (аффинных) преобразований (НТМ – Homogeneous Transformations Matrices) размерности 4×4 координатных систем n подвижных элементов станка:

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

где $T = T^R T^P = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, R и P – соответственно матрица вращений (3×3) и перемещений (трансляций) (1×3) и их матрицы погрешностей ET_i^R и ET_i^P ; $r = [X_r, Y_r, Z_r, 1]^T$ – столбцевая матрица точки инструмента; n – число координатных систем в цепи инструмент (ТСП), инструмент – деталь (также рассматриваются последовательные преобразования в системах инструмент – основание и основание – деталь, а погрешность определяют как их разность).

Преобразования координатных систем в зависимости от решаемой задачи выполняют операторы T , которые осуществляют:

- **евклидово преобразование координат**, не допускающее изменения формы, то есть можно перемещать, вращать и изменять масштаб;
- **аффинное преобразование координат**, допускающее изменение формы, то есть можно перемещать, сдвигать, вращать и изменять масштаб, но не менять структуру формы, при этом прямые линии остаются прямыми, параллельные – параллельными и т.п.;
- **проективные преобразования координат**, допускающие изменение структуры формы, т.е. можно перемещать, сдвигать, вращать и изменять масштаб и структуру формы, но прямые линии всегда остаются прямыми;
- **преобразования топологий**, допускающие изменение формы, то есть можно перемещать, сдвигать, вращать, изменять масштаб и форму, но точки всегда должны принадлежать соответствующей линии, линии – соответствующей поверхности и т.п.; иными словами, оператор каждой группы преобразований оставляет инвариантными те или иные свойства геометрических фигур.

Если с рассматриваемыми геометрическими элементами станка связать системы координат, то обобщенная матрица положений будет иметь вид:

$$M_P = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{xx} & \cos \alpha_{xy} & \cos \alpha_{xz} & a_x \\ \cos \beta_{yx} & \cos \beta_{yy} & \cos \beta_{yz} & a_y \\ \cos \gamma_{zx} & \cos \gamma_{zy} & \cos \gamma_{zz} & a_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Когда координатные системы являются ортогональными и неперекрывающимися, то положения координатных систем и, соответственно, связанных

с ними элементов станка могут быть описаны и определены последовательностью вращений вокруг координатных осей OX, OY, OZ соответствующими матрицами поворота: M_{px}, M_{py}, M_{pz} .

$$M_{px} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & a_x \\ 0 & \cos \alpha_x & -\sin \alpha_x & a_y \\ 0 & \sin \alpha_x & \cos \alpha_x & a_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$M_{py} = \begin{vmatrix} \cos \alpha_y & 0 & -\sin \alpha_y & a_x \\ 0 & 1 & 0 & a_y \\ \sin \alpha_y & 0 & \cos \alpha_y & a_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$M_{pz} = \begin{vmatrix} \cos \alpha_z & -\sin \alpha_z & 0 & a_x \\ \sin \alpha_z & \cos \alpha_z & 0 & a_y \\ 0 & 0 & 1 & a_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

где $a_{x,y,z}$ – расстояние между началами координатных систем; $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ – угловое положение координатных систем.

Тогда общая матрица положений M_p будет определяться произведением трех матриц вращений вокруг соответствующих осей

$$M_p = M_{px} M_{py} M_{pz}.$$

В случае, когда направления координатных осей совпадают, матрица положений будет определяться только значениями $a_{x,y,z}$.

Линейные δa и угловые $\delta \alpha$ погрешности положения определяют и обуславливают соответствующие значения матриц положений.

Линейные погрешности станут равны, например:

$$a'_x = a_x + \delta a_x.$$

Изменение положения вследствие вращения, например системы координат вокруг оси OX на угол α_x погрешностью $\delta \alpha_x$, приводит к изменению начального углового положения и станет $\alpha'_x = \alpha_x + \delta \alpha_x$.

Тогда матрица положения примет вид:

$$M_{px}^\delta = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & a'_x \\ 0 & \cos(\alpha_x + \delta \alpha_x) & -\sin(\alpha_x + \delta \alpha_x) & a'_y \\ 0 & \sin(\alpha_x + \delta \alpha_x) & \cos(\alpha_x + \delta \alpha_x) & a'_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

и, учитывая, что разложения для малых углов $\delta \alpha$ будут равны соответственно

$$\cos \alpha_x = 1 - \frac{\delta \alpha_x^2}{2!} + \frac{\delta \alpha_x^4}{4!} - \frac{\delta \alpha_x^6}{6!} \approx 1,$$

$$\sin \delta \alpha_x = \delta \alpha_x - \frac{\delta \alpha_x^3}{3!} + \frac{\delta \alpha_x^5}{5!} - \frac{\delta \alpha_x^7}{7!} \approx \delta \alpha_x,$$

а значения

$$\cos(\alpha_x + \delta \alpha_x) = \cos \alpha_x \cdot \cos \delta \alpha_x - \sin \alpha_x \cdot \sin \delta \alpha_x = \cos \alpha_x \cdot 1 - \delta \alpha_x \cdot \sin \alpha_x$$

$$\sin(\alpha_x + \delta \alpha_x) = \sin \delta \alpha_x \cdot \cos \alpha_x + \cos \alpha_x \cdot \sin \delta \alpha_x = \sin \alpha_x \cdot 1 + \delta \alpha_x \cdot \cos \alpha_x,$$

принимая во внимание, что погрешности (точность) перемещений и углов поворота являются малыми величинами по отношению к размерам самих деталей рабочих органов, а произведениями погрешностей второго порядка можно пренебречь, то в матричном виде обобщенная матрица точности (погрешностей) может быть записана без учета составляющих малого порядка ($\delta a_i \delta a_j$) и ($\delta \alpha_i \delta \alpha_j$). Тогда получим матрицу положения следующего вида:

$$M_{px}^\delta = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & a_x \\ 0 & (\cos \alpha_x - \delta \alpha_x \cdot \sin \alpha_x) & -(\sin \alpha_x + \delta \alpha_x \cdot \cos \alpha_x) & a_y \\ 0 & (\sin \alpha_x + \delta \alpha_x \cdot \cos \alpha_x) & (\cos \alpha_x - \delta \alpha_x \cdot \sin \alpha_x) & a_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

при значении $\alpha_x = 0$ выражение примет вид:

$$M_{px}^\delta = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & a_x \\ 0 & 1 & -\delta \alpha_x & a_y \\ 0 & \delta \alpha_x & 1 & a_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Введя обозначение матрицы $M_{px}^\delta = B_{px}^\alpha$ (при $\alpha_x = 0$), получаем значение матрицы положений, равное произведению матрицы начальных положений M_{px} и матрицы погрешности угловых B_{px}^α положений:

$$M_{px}^\delta = M_{px} B_{px}^\alpha,$$

или в общем виде, когда происходят вращения (изменения углового положения) с погрешностями последовательно вокруг трех осей координат:

$$M_x^\delta = M_{px} B_{px}^\alpha M_{py} B_{py}^\alpha M_{pz} B_{pz}^\alpha = M_p B^\alpha.$$

Тогда, если изменение угловых положений отсутствует, то матрицы $M_{px}, M_{py}, M_{pz} = I$ будут еди-

ничными и выражение M_x^δ будет определяться произведением матриц угловых погрешностей и станет равным:

$$M_x^\delta = B^\alpha = B_{px}^\alpha B_{py}^\alpha B_{pz}^\alpha$$

или

$$B^\alpha = \begin{pmatrix} 1 & -\alpha_z & \alpha_y & a_x \\ \alpha_z & 1 & -\alpha_x & a_y \\ -\alpha_y & \alpha_x & 1 & a_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Важно заметить, что при произведении n матриц B^α получим следующее равенство:

$$\prod_1^n B_i^\alpha = \begin{pmatrix} 1 & -\sum_1^n \alpha_{iz} & \sum_1^n \alpha_{iy} & \sum_1^n a_{ix} \\ \sum_1^n \alpha_{iz} & 1 & -\sum_1^n \alpha_{ix} & \sum_1^n a_{iy} \\ -\sum_1^n \alpha_{iy} & \sum_1^n \alpha_{ix} & 1 & \sum_1^n a_{iz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = B_{i\Sigma}^\alpha.$$

Следовательно, разность между заданным (номинальным) и действительным положениями будет определять погрешность взаимного положения элементов станка.

Рассмотренные погрешности зависят от многих факторов, поэтому они являются функциями состояний основных элементов станка и выражаются как $a_{ij} = f(X, Y, Z, \omega_x, \omega_y, \omega_z, P, T^\circ, \tau)$.

В то же время каждая погрешность является функцией состояний и может выражаться либо аналитически $a_{ij} = f(X, Y, Z, \omega_x, \omega_y, \omega_z, P, T^\circ, \tau)$, или, если функцию не удастся выразить аналитически, то в виде матрицы размера $m \times n$.

Таким образом, для более полного определения структурных составляющих геометрических погрешностей металлорежущего станка, которые определяются своими собственными значениями во множестве параметров состояний, будем рассматривать значения $a_{ij} = f(X, Y, Z, \alpha, \beta, \gamma, P, T^\circ, \tau)$ в качестве аддитивной функции множества состояний. Например, погрешности a_{ij} в поле пространственных состояний будем рассматривать в виде функции только параметров системы координат $a_{ij} = f(X, Y, Z)$ и, учитывая, что значения этой функции являются малыми величинами, то для нахождения этих значений функции $a_{ij} = f(X, Y, Z)$ воспользуемся разложением ее в ряд Тейлора и во внимание будем принимать только члены ряда первой, второй и более высокой степени в зависимости от требуемой точности станка.

Тогда, например, составляющие погрешности $\delta_x(X)$ в направлении оси OX будут определяться выражением:

$$\delta_x[(X)(Y, Z)] = f(Y, Z) = \delta_x(X) + \frac{\partial \delta_x[(X)(Y, Z)]}{\partial y} Y + \frac{\partial \delta_x[(X)(Y, Z)]}{\partial Z} Z = \delta_x(X) + \delta_x^y(X) Y + \delta_x^z(X),$$

где обозначим $\delta_x^y(X) = \frac{\partial \delta_x[(X)(Y, Z)]}{\partial y} Y$ и $\delta_x^z(X) = \frac{\partial \delta_x[(X)(Y, Z)]}{\partial Z} Z$, $\frac{\partial \delta_x[(X)(Y, Z)]}{\partial y} Y$ и $\frac{\partial \delta_x[(X)(Y, Z)]}{\partial Z} Z$ являются соответствен-

но тангенсами касательной к функции $\delta_x[(X)(Y, Z)]$, а ее графическая интерпретация приведена на рис. 7.

Применяя аналогичные преобразования разложения в ряд Тейлора для всех составляющих δa_i , $\delta \alpha_j$ матрицы B^α , получим следующие соотношения для функции $a_{ij} = f(X, Y, Z, \alpha, \beta, \gamma, P, T^\circ, \tau)$ во множестве области поля функции состояний для составляющих структуры погрешностей металлорежущих станков. Например, для линейных погрешностей:

$$a_x = (a_{xx} + a_{xy} + a_{xz}) = \delta_x(X) + \delta_x(Y) + \delta_x(Z) + \delta_x^y(X) Y + \delta_x^z(X) Z + \delta_x^x(Y) X + \delta_x^z(Y) Z + \delta_x^y(Z) Y + \delta_x^x(Z) X + \delta_x(P_x) + \delta_x(P_y) + \delta_x(P_z) + \delta_x^y(P_x) Y + \delta_x^z(P_x) Z + \delta_x^x(P_x) X + \delta_x^z(P_y) Z + \delta_x^y(P_z) Y + \delta_x^x(P_z) X + \delta_x(P_z^G) + \delta_x^y(P_z^G) Y + \delta_x^x(P_z^G) X + \delta_x(T_x^\circ) + \delta_x(T_y^\circ) + \delta_x(T_z^\circ) + \delta_x^y(T_x^\circ) Y + \delta_x^z(T_x^\circ) Z + \delta_x^x(T_x^\circ) X + \delta_x^z(T_y^\circ) Z + \delta_x^y(T_z^\circ) Y + \delta_x^x(T_z^\circ) X + \delta_x(XT^\circ) + \delta_x(YT^\circ) + \delta_x(ZT^\circ) + \delta_x^y(XT^\circ) Y + \delta_x^z(XT^\circ) Z + \delta_x^x(YT^\circ) X + \delta_x^z(YT^\circ) Z + \delta_x^y(ZT^\circ) Y + \delta_x^x(ZT^\circ) X + a_{xx}(\tau).$$

Существующие методы оценки основаны на непосредственных прямых методах измерения геометрических погрешностей. Функциональная связь между измеренной величиной геометрических ошибок в узлах станка и величиной смещений ТСР может быть установлена экспериментально. При хорошей повторяемости и достаточно стабильной воспроизводимости результата эта функциональная связь выразится уравнением, которое может быть положено в основу работы системы для компенсации, коррекции или управления точностью станка (рис. 8). Преобразуем и представим выражение для δr в следующем виде:

$$\delta r = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\prod_{i=1}^{n-(i+1)} M_i \right) \cdot K_{ji} \cdot \delta r_i^0 + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\prod_{i=1}^{n-(i+1)} M_i \right) \cdot (B_i) \cdot r_i + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\prod_{i=1}^{n-(i+1)} M_i \right) \cdot (B_i) \cdot K_{ji} \cdot \delta r_i^0 \Rightarrow \Delta(\rightarrow 0),$$

где n – число квазистабильных связей; $i = (n - 1)$ – число элементов структуры станка; $\delta r = |\delta x \delta y \delta z|$ – погрешность взаимного относительного положения инструмента и детали, обусловленная погрешностями станка; $\delta r_i^0 = |\delta x_i^0 \delta y_i^0 \delta z_i^0|^T$ – линейные начальные

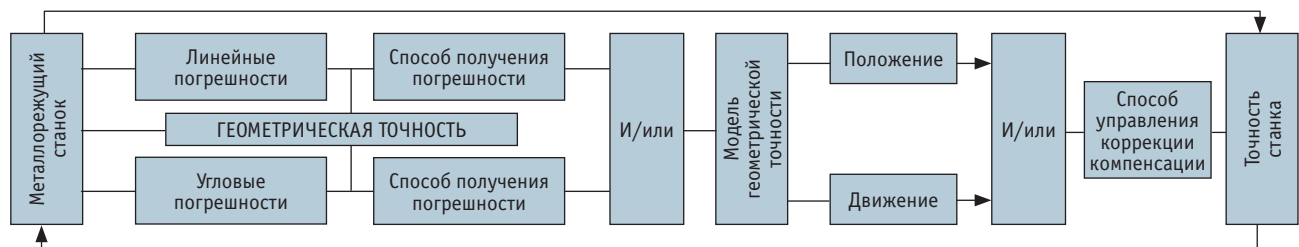


Рис. 8. Модель изменения геометрической точности

погрешности положения (смещения, деформации) элементов станка в местах квазистабильных связей.

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:

- **1-й вид** – 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 связей элементов модели точности станка;
- **2-й вид** – 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 связей элементов модели точности станка, линейных и угловых погрешностей движения в поле функции их пространственных состояний;
- **3-й вид** – 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 связей элементов модели точности станка, линейных и угловых погрешностей движения в поле функции их состояний.

Каждая из указанных моделей определяется видом и параметрами характеристик состояний погрешностей и их функциональных взаимосвязей. Например, для первой модели характерно рассмотрение составляющих функции линейных $\delta_x[(X)(Y,Z)]$ и угловых $\alpha_x[(X)(Y,Z)]$ погрешностей по каждой из осей координатной структуры станка.

ЛИТЕРАТУРА

1. ISO 230-1:2012 Test code for machine tools – Part 1 (2012).

2. **Donaldson R.** Error Budgets, Technology of Machine Tools, Vol. 5: Machine Tool Accuracy, Lawr. Liverm. Lab., Univ. of California, UCRL-52960-5, Livermore, CA (1980).
3. **Reshetov D. N., Portman V. T.** Accuracy of Machine Tools, ASME Press, NY, (1988), 304 p.
4. **Slocum A. H.** Precision machine design, New Jersey. Prentice – Hall Inc. (1992), 750 p.
5. **Moriwaki T., Sugimura N. and Miao Y.** Analytical approach for accuracy design of machine tools, Transactions of the JSME, Series C, 59 (1993), No. 549, 2564–2569.
6. **Inasaki I., Kishinami K., Sakamoto S., Sugimura N. Takeuchi F. and Tanaka F.** Shape generation theory of machine tools. Tokyo, Yokendo Press (1994) 95–103.
7. **Kiridena V. S. B., Ferreira P. M.** Kinematic modeling of quasistatic errors of three-axis machining centers. Intern. J. Machine Tools and Manuf., 34 (1994), Issue 1, 85–100.
8. **Okafor A. C., Ertekin Y. M.** Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics. Intern. J. Machine Tools and Manuf., 40 (2000), Issue 8, 1199–1213.
9. **Mekid S.** Introduction to precision machine design and error assessment. CRC Press Taylor & Francis Group, 2009. 330 p.
10. **Fu G., Fu J., Xu Y., Chen Z.** Product of exponential model for geometric error integration of multi-axis machine tools. Intern. J. Adv. Manuf. Technology. 71 (2014) 1653–1667.
11. **Guoqiang Fu, Jianzhong Fu, Hongyao Shen, Yuetong Xu, Yu'an Jin.** Product-of-exponential formulas for precision enhancement of five-axis machine tools via geometric error modeling and compensation. Intern. J. Adv. Manuf. Technology. 78 (2015) 1653–1667.
12. **Yu Qiao, Youping Chen, Jixiang Yang, Bing Chen.** A five-axis geometric errors calibration model based on the common perpendicular line (CPL) transformation using the product of exponentials (POE) formula. International Journal of Machine Tools & Manufacture 118–119 (2017) 49–60.
13. **Qiang Cheng, Bingwei Sun, Zhifeng Liu, Qianan Feng, Peihua Gu.** Geometric error compensation method based on Floyd algorithm and product of exponential screw theory. Proc IMechE Part B:J. Engineering Manufacture 2018, Vol. 232(7) 1156–1171.

14. **Shijie Guo, Shufeng Tang, Dongsheng Zhang.** A Recognition Methodology for the Key Geometric Errors of a Multi-Axis Machine Tool Based on Accuracy Retentivity Analysis. Hindawi Complexity (2019), <https://doi.org/10.1155/2019/8649496>.
15. **Jie Gu, John S. Agapiou and Sheri Kurgin.** Global Offset Compensation for CNC Machine Tools Based on Workpiece Errors. Proc. Manuf., 5 (2016), 442–454.
16. **ISO/TR 16907:2015(E).** Machine tools — Numerical compensation of geometric errors. ISO office, Switzerland, 2015.
17. **Schwenke H., Knapp W., Haitjema H., Weckenmann A., Schmitte R., Delbressine F.** Geometric error measurement and compensation of machines. CIRP Annals — Manuf. Technology, 57 (2008) 660–675.
18. **Кузнецов А. П.** Методы оценки и контроля качества металлорежущих станков. — М.: ВНИИТЭМР, 1985. 68 с.
19. **Кузнецов А. П.** Тепловое поведение и точность металлорежущих станков. — М.: Янус-К, 2011. 256 с.
20. **Кузнецов А. П., Косов М. Г.** Структурная точность металлорежущих станков // СТИН. 2012. № 2. С. 4–12.
21. **Кузнецов А. П., Косов М. Г.** Структурная точность металлорежущих станков // СТИН. 2012. № 5. С. 2–7.
22. **Кузнецов А. П.** Структуры процессов и оборудования для обработки резанием. Часть 3. Структуры процессов для обработки резанием. // Вестник машиностроения. 2015. № 3. С. 76–87.
23. **Бушуев В. В., Кузнецов А. П., Сабилов Ф. С., Хомяков В. С., Молодцов В. В.** Проблемы точности и эффективности современных металлорежущих станков // СТИН. 2016. № 2. С. 6–16.
24. **Кузнецов А. П.** Эволюция методов оценки точности металлорежущих станков и тенденции ее изменения. Часть 1. Эволюция понятия точность и ее физическая модель // Вестник машиностроения. 2016. № 12. С. 8–16.
25. **Кузнецов А. П.** Эволюция методов оценки точности металлорежущих станков и тенденции ее изменения. Часть 2. Эволюция понятий и моделей оценок точности металлорежущих станков и тенденции ее изменения // Вестник машиностроения. 2017. № 8. С. 22–35.
26. **Кузнецов А. П.** Точность металлорежущих станков в ее историческом развитии. Часть 1 // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2017. № 3. С. 20–29.
27. **Кузнецов А. П.** Точность металлорежущих станков в ее историческом развитии. Часть 2 // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2017. № 4. С. 14–21.

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

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 760 руб.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



Издание 2-е, испр. и доп.

Кондрашин А. А., Лямин А. Н., Слепцов В. В.

Данное учебное пособие является первой книгой по технологиям изготовления, сканирования и визуализации трехмерных электронных устройств (ТЭУ). С развитием высоких технологий становится реальным выпуск ТЭУ, в том числе микронных и субмикронных многослойных схем. На основе классификации формирования ТЭУ на плоских (2D) и квазиобъемных (квази-3D) подложках рассмотрены основные принципы и характеристики технологий плоской печати. Сделан вывод о невозможности изготавливать по этим технологиям объемные структуры сложной формы в непрерывном технологическом цикле, а также проанализированы возможности современных технологий для производства ТЭУ.

Учебное пособие может быть рекомендовано бакалаврам и магистрам высших учебных заведений.

М.: ТЕХНОСФЕРА,
 2019. – 210 с.
 ISBN 978-5-94836-504-6

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я91; ☎ +7 495 234-0110; 📞 +7 495 956-3346; ✉ knigi@technosphaera.ru, sales@technosphaera.ru