

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ МНОГОКООРДИНАТНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

© 2011 Е. Ю. Исмаилова

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассмотрены факторы, влияющие на числовую величину, положение в пространстве и характер распределения замыкающего вектора пространственной размерной цепи, который выражает сумму производственных погрешностей, действующих при многокоординатной обработке на станках с ЧПУ.

Пространственная размерная цепь, многокоординатная обработка, станок с ЧПУ.

При изготовлении сложных фасонных поверхностей деталей машин и механизмов, в том числе деталей газотурбинных двигателей – валов, корпусов, лопаток, в части механической обработки применяются станки с числовым программным управлением. Процесс формообразования поверхностей деталей при этом связан с управлением по

двум, трем и более координатам, следовательно, на точность обработки деталей будут оказывать влияние действующие в технологической системе систематические постоянные, систематические закономерно изменяющиеся и случайные факторы по каждой управляемой координате (рис. 1).

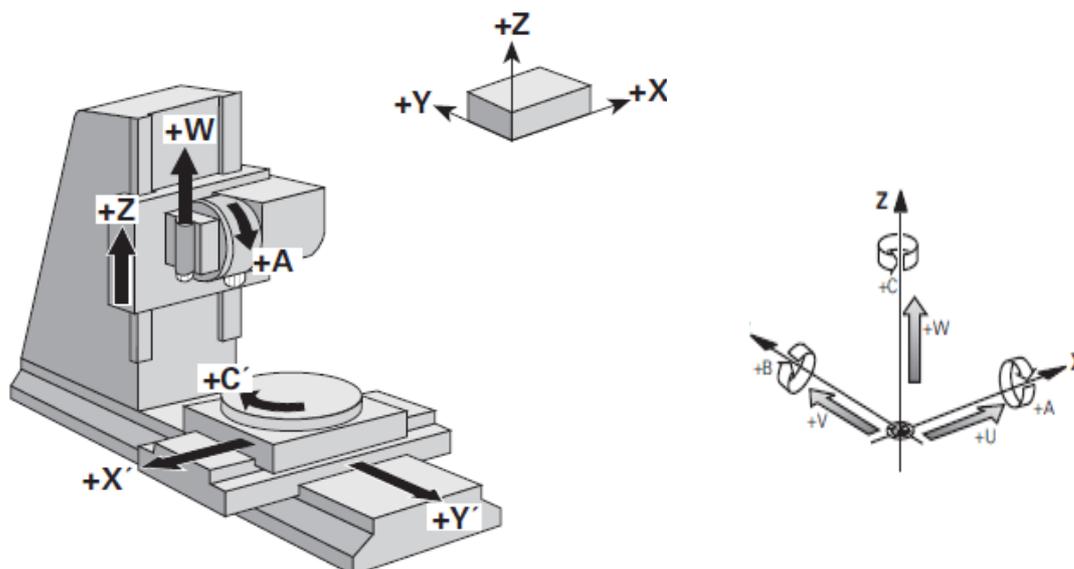


Рис. 1. Оси координат станка согласно рекомендациям ИСО

При управлении обработкой по двум координатам X и Y формообразование происходит в координатной плоскости $X_1O_1Y_1$. В этом случае суммарное действие производственных погрешностей графически можно представить вектором \bar{R}_1 (рис. 2).

При наличии на станке с ЧПУ поворотного стола появляется возможность автоматического управления поворотом вокруг оси Z. Согласно рекомендациям ИСО

поворотные координаты вокруг осей X, Y, Z обозначаются символами A, B, C соответственно (см. рис. 1).

Третья управляемая координата «C» внесет угловую ошибку. При этом повороте координатная плоскость $Y_1O_1Z_1$ повернется на угол φ . На рис. 2 показано новое возможное положение системы координат – $X_2Y_2Z_2$, начало которой совмещено с концом вектора R_1 .

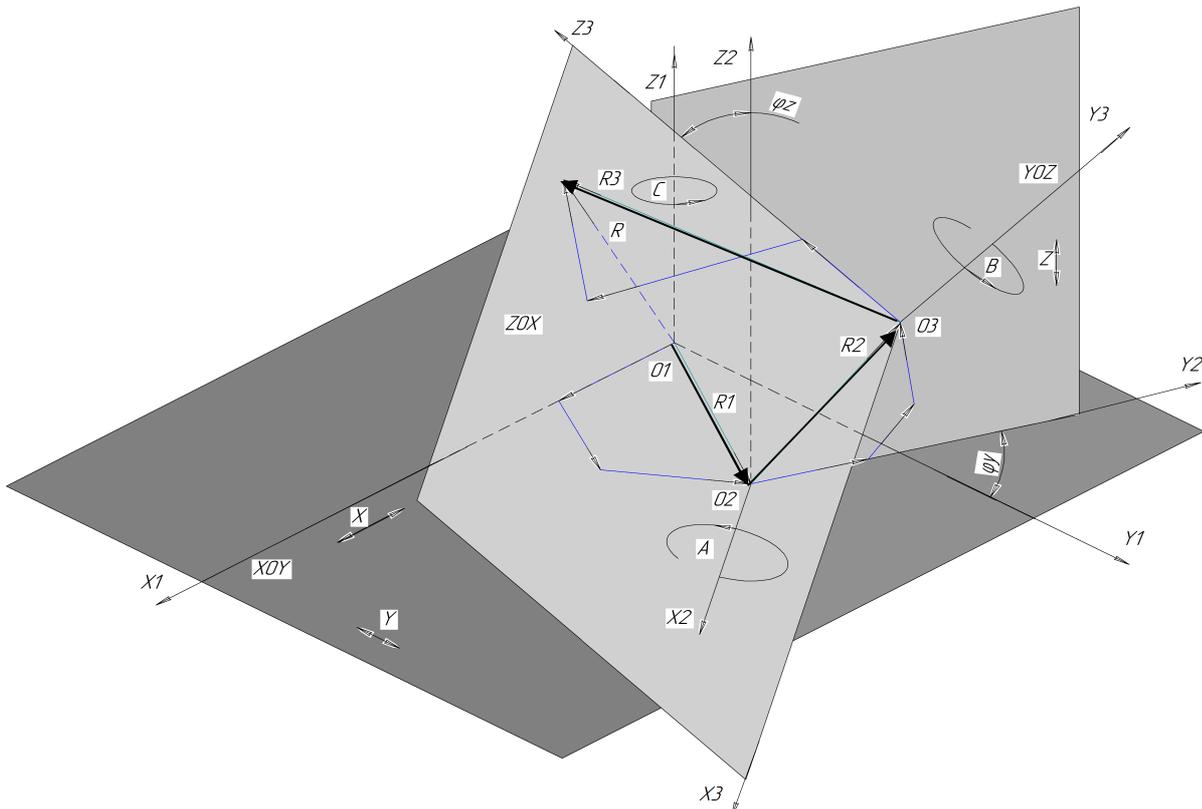


Рис. 2. Схема связей координатных плоскостей и векторных погрешностей при управлении станком с ЧПУ по пяти координатам

Перемещение в плоскости $Y_2O_2Z_2$ добавляет к автоматическому управлению четвертую координату – Z . Погрешности, которые действуют в координатной плоскости $Y_2O_2Z_2$, графически могут быть выражены суммарным вектором \bar{R}_2 . Подобным образом вектором \bar{R}_3 выражены суммарные погрешности, действующие в координатной плоскости $Z_3O_3X_3$, и вектором \bar{R}_4 – суммарные погрешности в плоскости $X_4O_4Y_4$, которая не совпадает с первоначальной координатной плоскостью $X_1O_1Y_1$ (рис. 3).

Поворот «А» вокруг оси X реализует пятую управляемую координату. При этом система координат с началом, перенесенным в конец вектора R_2 , повернутая на угол φ_2 , займет возможное положение $X_3Y_3Z_3$ (см. рис. 2).

Шестая управляемая координата – поворот «В» вокруг оси Y – приведет систему координат, совмещенную с концом вектора \bar{R}_3 , через угол φ_3 в следующее возможное положение – $X_4Y_4Z_4$ (см. рис. 3).

Автоматическое управление поворотами вокруг осей X и Y реализуется при на-

личии на станках с ЧПУ качающегося стола или поворотной инструментальной головки, с помощью которой происходит изменение ориентации оси режущего инструмента.

Таким образом, погрешности при обработке заготовки на станке с ЧПУ с управлением по шести координатам можно определить четырьмя векторами и тремя поворотами. Последовательность размерных связей при этом представлена схемой на рис. 4.

Цепь связей можно продолжать, исходя из требований к расположению обрабатываемых поверхностей заготовки.

Полученные схемы отражают всю совокупность линейных и угловых связей обрабатываемых размеров и погрешностей, действующих при обработке.

Для описания поворотов твердого тела в трехмерном пространстве используют углы Эйлера (ψ ; θ ; φ) – три угла вращения вокруг взаимно перпендикулярных осей, которые называются углами прецессии, нутации и собственного вращения. Более образно эти углы называют в аэродинамике: рысканье, тангаж и крен.

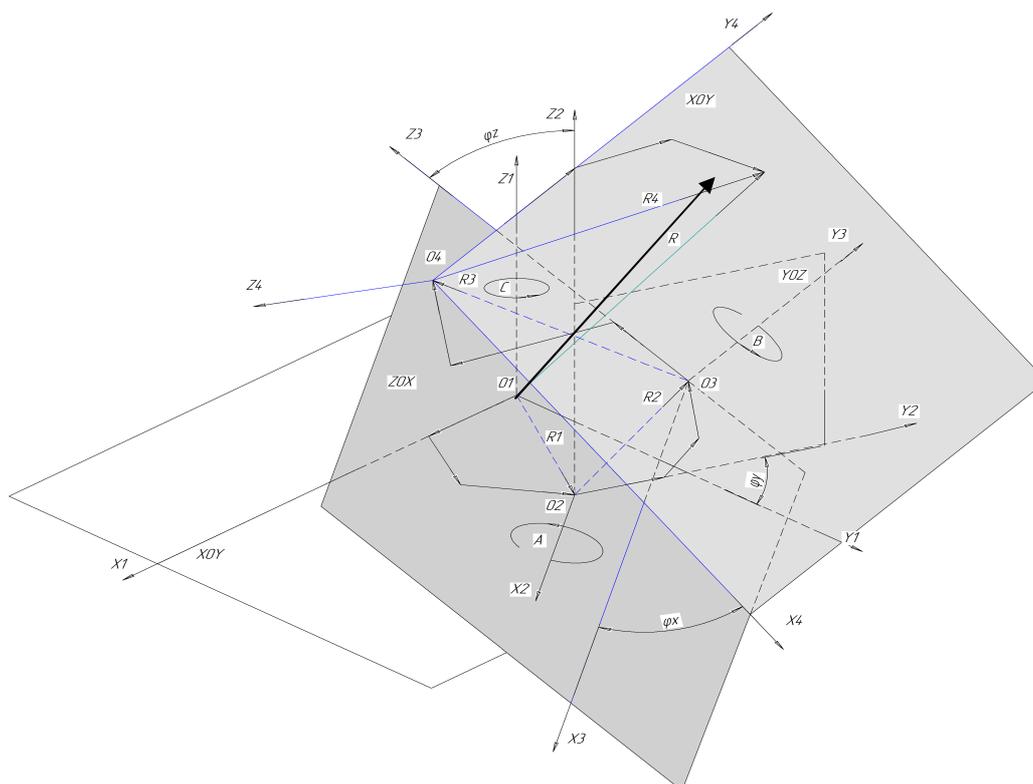


Рис. 3. Возможное положение координатной плоскости $X_4O_4Y_4$ и пространственного вектора \vec{R}_4 после поворота «В» системы координат (на угол φ_x)

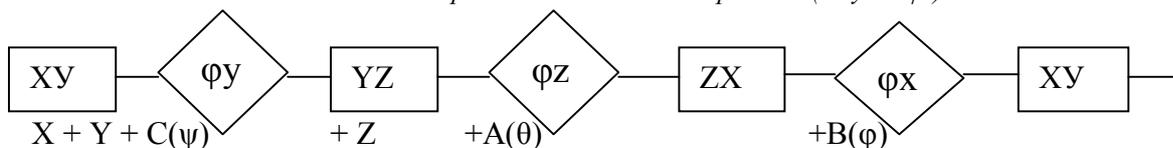


Рис. 4. Схема размерных связей

Несмотря на некоторое отличие, можно провести аналогию поворотов системы координат станка с ЧПУ с углами Эйлера:

- координата «С» (поворот вокруг оси Z) – угол прецессии ψ – рысканье;
- координата «А» (поворот вокруг оси X) – угол нутации θ – тангаж;

- координата «В» (поворот вокруг оси Y) – угол вращения φ – крен.

Тогда при переходе от одной системы координат к другой можно использовать матрицу перехода Эйлера (табл.1):

Таблица 1. Матрица перехода Эйлера

$\text{Cos}\varphi \cdot \text{Cos}\psi - \text{Sin}\varphi \cdot \text{Cos}\theta \cdot \text{Sin}\psi$	$-\text{Cos}\varphi \cdot \text{Sin}\psi - \text{Sin}\varphi \cdot \text{Cos}\theta \cdot \text{Cos}\psi$	$\text{Sin}\varphi \cdot \text{Cos}\theta$	0
$\text{Sin}\varphi \cdot \text{Cos}\psi + \text{Cos}\varphi \cdot \text{Cos}\theta \cdot \text{Sin}\psi$	$-\text{Sin}\varphi \cdot \text{Sin}\psi + \text{Cos}\varphi \cdot \text{Cos}\theta \cdot \text{Cos}\psi$	$-\text{Cos}\varphi \cdot \text{Sin}\theta$	0
$\text{Sin}\theta \cdot \text{Sin}\psi$	$\text{Sin}\theta \cdot \text{Cos}\psi$	$\text{Cos}\theta$	0
0	0	0	1

Поворотные координаты А,В,С имеют общее свойство с углами Эйлера – они некоммутативны, то есть конечное положение системы зависит от порядка, в котором совершаются повороты. Если повернуть по координате «С», а затем по координате «А», то ориентация заготовки не обязательно совпа-

дет с ориентацией при повороте сначала «А», а потом «С».

Графически пространственные погрешности образуют замкнутый пространственный многоугольник, сторонами которого являются векторы. Этот многоугольник выражает пространственную векторную цепь,

закрывающим звеном которой является суммарный вектор \bar{R} , а составляющими звеньями – векторы $\bar{R}_1, \bar{R}_2, \bar{R}_3$. Каждый вектор должен отражать всю совокупность погрешностей, влияющих на точность получения параметров в соответствующей координатной плоскости. Такими погрешностями могут быть:

- погрешность установки приспособления (смещение базовой точки приспособления относительно «нуля» станка);
- погрешность установки заготовки (смещение системы координат заготовки относительно базовой точки приспособления);
- погрешности настройки режущего инструмента;
- погрешности позиционирования по каждой координате, в том числе поворотной;
- погрешности, связанные с методом обработки;
- погрешности, связанные с дискретностью станка и другие.

Для обеспечения точности обработки на станке с ЧПУ необходимо, чтобы поле рассеивания ω суммы всех действующих при выполнении операции погрешностей было не больше допуска на выдерживаемые параметры детали, т.е.

$$\omega < T. \tag{1}$$

Таблица 2. Способы задания вектора в плоскости XOY

Варианты	X	Y	$ \bar{r} $	β
1	*	*		
2	*		*	
3	*			*
4		*	*	
5		*		*
6			*	*

Аналогично определяются векторы в координатной плоскости YOZ и XOZ.

Если составляющий вектор \bar{r}_1 рассматривать как точку плоскости с координатами (x_1, y_1) , то допуски на заданные значения координат вызовут возможное смещение точек конца вектора в пределах от x_{1min} до x_{1max} и от y_{1min} до y_{1max} . Из рис. 5,а видно, что координаты точек конца вектора будут рас-

Таким образом, задачей является: установить закон распределения и величину поля рассеивания суммарного вектора \bar{R} , который определяется в пространственной векторной цепи как замыкающее звено. Он будет функцией векторов – составляющих звеньев, и углов поворота φ , которые определяют положение одной координатной системы относительно другой:

$$\bar{R} = f(\bar{R}_1, \bar{R}_2, \bar{R}_3, \bar{R}_4, \varphi_y, \varphi_z, \varphi_x). \tag{2}$$

Очевидно, что определение вектора \bar{R} зависит от способа определения составляющих векторов. Для любого из векторов, лежащих в какой-либо координатной плоскости, существует не единственный способ определения.

Число возможных способов задания вычисляется по формуле:

$$C_m^n = \frac{n!}{m!(n-m)!} = \frac{4!}{2!(4-2)!} = 6, \tag{3}$$

где n – число возможных параметров для определения вектора в плоскости,

m – число необходимых и достаточных параметров.

Таким образом, вектор \bar{r}_1 в плоскости XOY может быть задан одним из следующих вариантов:

сеиваться в пределах некоторой прямоугольной области.

На рис. 5,б показана область рассеивания точек конца вектора, если он определен полярными координатами: модулем $|\bar{r}|$ и углом β и допусками на эти параметры. Формой области рассеивания в этом случае является часть кольца.

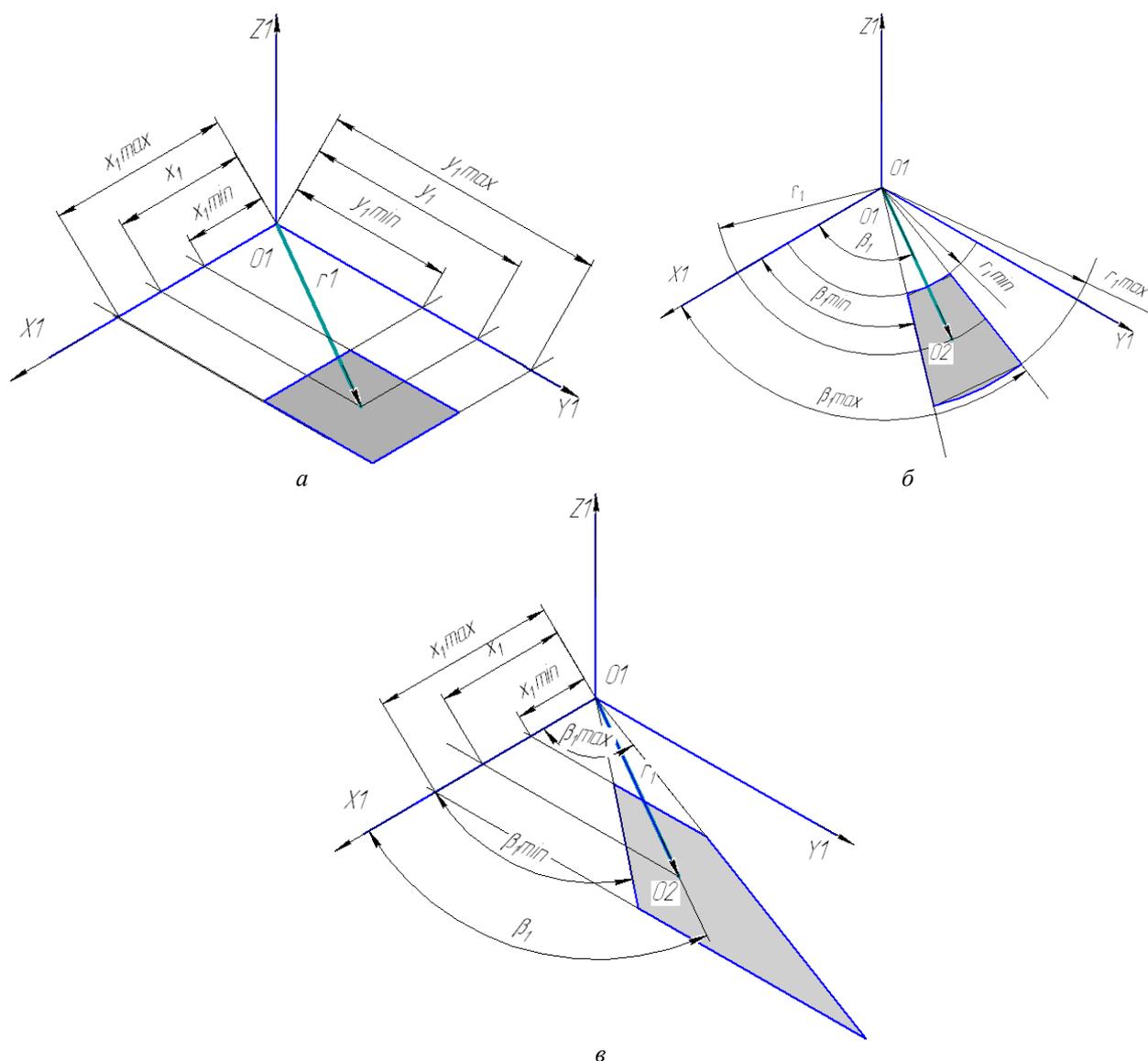


Рис. 5. Формы области рассеивания точек конца вектора при различных способах задания вектора: координатами x, y и их допусками (а); модулем $|\vec{r}|$, углом β и их допусками (б); координатой x , углом β и их допусками (в)

Если вектор определен комбинированным способом – одной из координат, например координатой x , углом β , то область рассеивания точек конца вектора за счет допусков на параметры (x, β) примет форму трапеции, что представлено на рис. 5,в.

Если теперь произвести суммирование двух векторов в плоскости, можно построить область рассеивания точек конца суммарного вектора $|\vec{R}|$. Допустим, что рассеивание первого вектора \vec{r}_1 определено прямоугольной областью (рис. 6,а). Точки конца второго вектора \vec{r}_2 имеют круговую область рассеивания. Такое сочетание может иметь ме-

сто при позиционировании в точку с заданными координатами.

Область точек конца вектора \vec{r}_2 может поворачиваться за счет погрешности угла поворота T_β .

Область рассеивания точек конца суммарного вектора сформируется путем плоскопараллельного переноса пучка векторов \vec{r}_2 по границе области рассеивания вектора \vec{r}_1 . Из рис. 6,в,г видно, что на форму суммарной области рассеивания двух векторов влияет последовательность слагаемых: сложение прямоугольной области с круговой и сложение кругового рассеивания с прямоугольным приводит к разному результату.

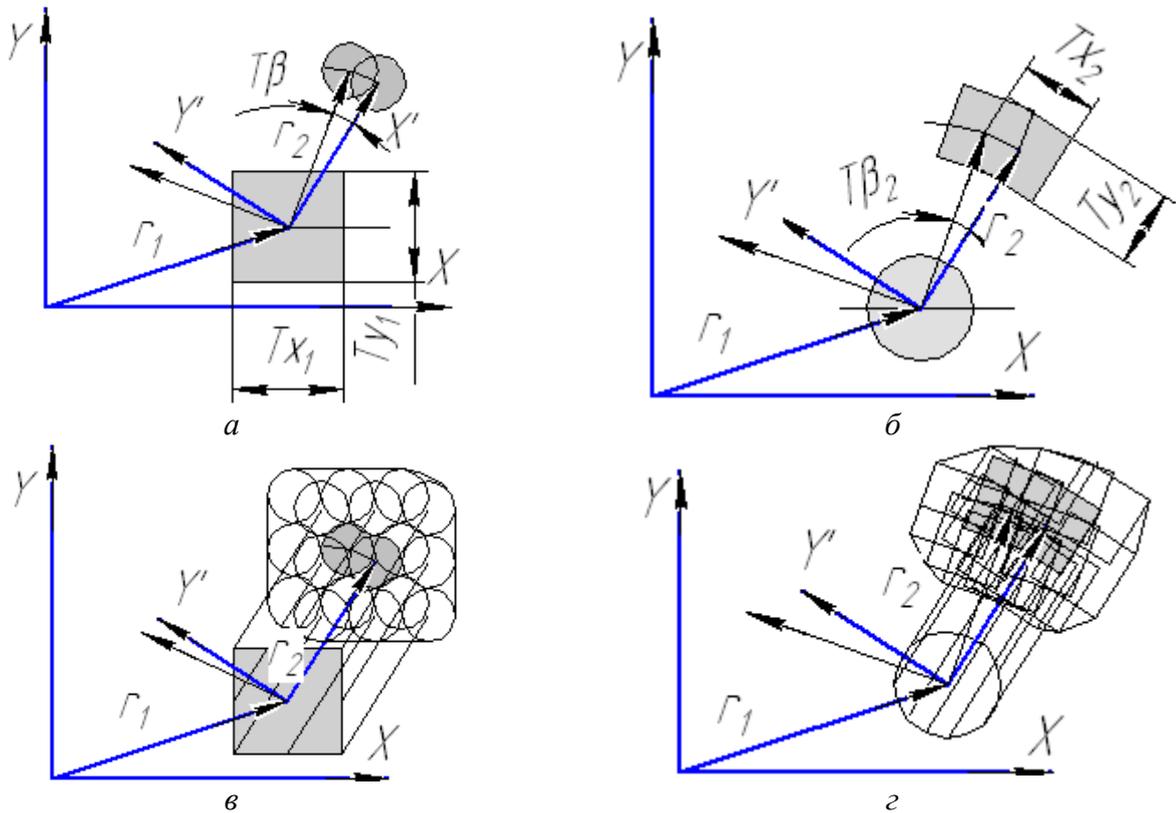


Рис. 6. Суммарная область рассеивания двух векторов

Отсюда следует, что суммирование многозвенной плоской векторной цепи приведет к сложной форме области рассеивания конца суммарного вектора, причем в каждой координатной плоскости (векторы \bar{R}_1 , \bar{R}_2 , \bar{R}_3 на рис. 1).

Последующее суммирование векторов в пространственной цепи еще более усложнит форму области рассеивания конца суммарного вектора \bar{R} (см. рис. 1, 2).

Эта сложная область будет основанием конической фигуры, которой определится фактическое значение замыкающего вектора \bar{R} и его положение в пространстве. Вершина конической фигуры находится в начале системы координат станка.

На положение замыкающего (суммарного) вектора в пространстве и на его область рассеивания, помимо рассмотренных параметров, будут влиять длины составляющих цепь векторов. Это видно из формулы (4) и доказано математически в исследовательских работах профессора Ф.И. Демина, т.е.

$$\omega R = f(\omega R_1, \omega R_2, \dots, \omega R_n, |\bar{R}_1|, |\bar{R}_2|, \dots, |\bar{R}_n|). \quad (4)$$

Вероятность попадания конца суммарного вектора в допустимые пределы зависит от законов распределения и числовых характеристик составляющих векторов.

Вывод

При многокоординатной обработке поверхностей деталей на станках с ЧПУ суммарная производственная погрешность может быть представлена замыкающим вектором пространственной размерной цепи.

На числовое значение замыкающего вектора, его положение в пространстве и характер распределения влияют следующие параметры:

- число управляемых координат;
- характер действующих производственных погрешностей;
- способы задания и форма области рассеивания точек конца составляющих векторов;
- последовательность суммирования составляющих векторов;
- длины составляющих векторов;
- углы поворота одной системы координат относительно другой;
- законы распределения составляющих погрешностей и их числовые характеристики.

Библиографический список

1. Базров, Б.М. Основы технологии машиностроения [Текст] / Б.М.Базров. М.: Машиностроение, 2007. – 736с.

2. Демин, Ф.И. Расчеты точности геометрических систем и моделей [Текст] / Ф.И. Демин // Основы теории точности машин и приборов. – СПб.: Наука, РАН, Институт проблем машиноведения, 1993. - С.87-125.

**MISTAKES ANALYSIS OF MULTICOORDINATE PROCESSING
ON THE MACHINE TOOLS WITH THE NUMERICAL CONTROL BY PROGRAM**

© 2011 E. Yu. Ismaylova

Samara State Aerospace University named after academician S.P.Korolyov
(National Research University)

The examined factors, which influence on the numerical value, position in space and character of distribution of a closing vector of a dimensional chain which expresses the sum of the production errors, existing when multicoordinate processing on machine tools with the numerical control by program.

Error, a closing vector, random and systematic components, multicoordinate processing, character of distribution, a dimensional chain.

Информация об авторах

Исмайлова Елена Юрьевна, заведующая отделением технологии машиностроения авиационного техникума, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 995-21-99, (846) 959-47-34. E-mail: iselena-U@yandex.ru. Область научных интересов: точность обработки сложных поверхностей на станках с числовым программным управлением.

Ismaylova Elena Yuryevna, Managing branch «Technology of mechanical engineering» of Aerospace technical school, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 995-21-99, (846) 959-47-34. E-mail: iselena-U@yandex.ru. Area of research: The working on the machine tools with the numerical control by program.