

УДК 621.865.8

О.Н. Крахмалев

## ПЕРВИЧНЫЕ ОТКЛОНЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОЗВЕННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ И СТАНКОВ С ЧПУ

Рассмотрено построение модели геометрических отклонений, описывающей первичные отклонения геометрических параметров звеньев и отклонения позиционирования исполнительных механизмов промышленных роботов и многокоординатных станков с ЧПУ, структура которых представляет собой многозвенную механическую систему.

Ключевые слова: точность станков, первичные отклонения звеньев, отклонения позиционирования, однородные преобразования координат, модели геометрических отклонений.

**Многозвенные механические системы.** Структурный анализ оборудования, входящего в состав робототехнических комплексов, позволяет отнести это оборудование к многозвенным механическим системам. Так, число звеньев в разомкнутых кинематических цепях промышленных роботов может составлять от 3 до 7, в станках и обрабатывающих центрах - от 2 до 5. Лишь в механизмах, имеющих одну степень свободы, например в приводах, представляющих собой сочетание двигателя и передаточного механизма, кинематические цепи могут быть приведены к выходному звену, совершающему характерное движение, вращательное или поступательное.

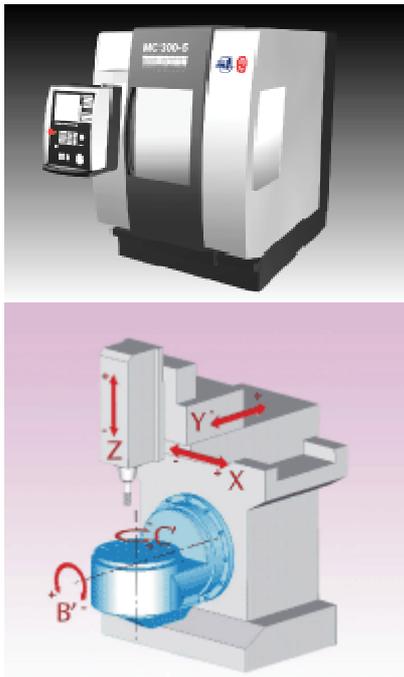


Рис. 1. Обрабатывающий центр MC-300

В качестве примера использования многозвенных механических систем в конструкциях механообрабатывающего технологического оборудования можно рассмотреть многокоординатный обрабатывающий центр MC-300, разработанный ОАО «НИАТ» (Россия) (рис. 1). Структурно данное оборудование включает в себя два исполнительных механизма, представляющих собой разомкнутые многозвенные кинематические цепи. Один механизм обеспечивает перемещение рабочего органа с инструментом по трём линейным координатам ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ), второй механизм обеспечивает поворот стола с закреплённой на нём заготовкой по двум угловым координатам ( $B$ ,  $C$ ). Совместное перемещение обоих механизмов обеспечивает пять формообразующих координатных движений, что позволяет обрабатывать детали, имеющие сложную геометрическую форму (пресс-формы, штампы). В данном случае инструмент выполняет только поступательные движения.

В промышленных роботах исполнительные механизмы представляют собой манипуляторы, звенья которых могут совершать поступательные или вращательные движения относительно опорных для них звеньев. Опорным для данного звена считается звено, соединяющее его через цепь других звеньев с неподвижным основанием. Например, звенья манипулятора промышленного робота KR 30 могут совершать относительные вращательные движения по угловым координатам  $A_k$ ,  $k = 1 \dots 6$  (рис. 2).

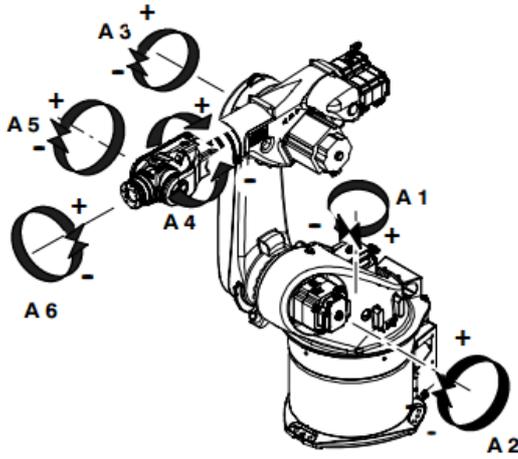


Рис. 2. Кинематическая схема промышленного робота KR 30

**Первичные отклонения звеньев.** При изготовлении и сборке деталей и узлов, составляющих звенья многозвенных механических систем, неизбежны отклонения их геометрических размеров и формы. Такие отклонения принято называть первичными [1]. Учесть первичные отклонения звеньев в динамических моделях многозвенных механических систем можно, например, при составлении матриц преобразования однородных координат, отражающих преобразования координат между связываемыми с каждым звеном системами координат.

При использовании двух систем координат  $S_i$  и  $S_{i^*}$ ,  $i = 1 \dots n$ , связываемых с центрами шарниров каждого звена (рис. 3), относительное положение этих систем координат может быть определено матрицей преобразования однородных координат размерности  $4 \times 4$ :

определено матрицей преобразования однородных координат размерности  $4 \times 4$ :

$$A_{i,i^*} = \begin{bmatrix} \cos(X_i, X_{i^*}) & \cos(X_i, Y_{i^*}) & \cos(X_i, Z_{i^*}) & l_x^{(i)} \\ \cos(Y_i, X_{i^*}) & \cos(Y_i, Y_{i^*}) & \cos(Y_i, Z_{i^*}) & l_y^{(i)} \\ \cos(Z_i, X_{i^*}) & \cos(Z_i, Y_{i^*}) & \cos(Z_i, Z_{i^*}) & l_z^{(i)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $\cos(X_i, X_{i^*})$  и т.д. – косинусы углов между соответствующими осями систем координат  $S_i$  и  $S_{i^*}$ ;  $l_x^{(i)}, l_y^{(i)}, l_z^{(i)}$  – координаты начала системы  $S_{i^*}$  в системе  $S_i$ .

В исходном положении конфигурация многозвенной механической системы задаётся углами между осями систем координат  $S_i$  и  $S_{i^*}$ . Если за исходное принять положение, при котором эти углы имеют значения 0 или  $\pm 90^\circ$ , то косинусы в (1) станут равными 1 или 0.

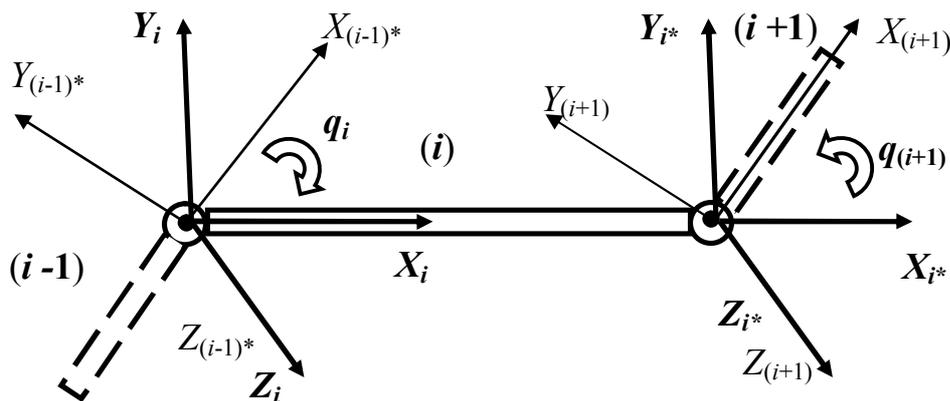


Рис. 3. Связываемые системы координат  $S_i(X_i, Y_i, Z_i)$  и  $S_{i^*}(X_{i^*}, Y_{i^*}, Z_{i^*})$

Первичные отклонения геометрических размеров звеньев многозвенных механических систем могут быть учтены введением линейных отклонений по соответствующим осям координат –  $\delta_x^{(i)}, \delta_y^{(i)}, \delta_z^{(i)}$  (рис. 4), а первичные отклонения формы звеньев – введением угловых отклонений между соответствующими осями координат:  $\alpha_{xx}^{(i)}, \alpha_{xy}^{(i)}, \alpha_{xz}^{(i)}, \alpha_{yx}^{(i)}, \alpha_{yy}^{(i)}, \alpha_{yz}^{(i)}, \alpha_{zx}^{(i)}, \alpha_{zy}^{(i)}, \alpha_{zz}^{(i)}$ .

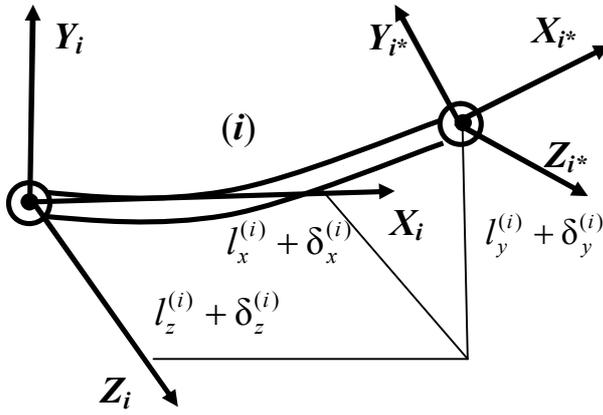


Рис. 4. Первичные отклонения звена

С учётом первичных отклонений звеньев матрица  $A_{i,i^*}$ , отражающая преобразование однородных координат из системы  $S_{i^*}$  в систему  $S_i$ , будет иметь вид (2).

Введенные линейные отклонения отражают отклонения геометрических размеров звеньев, приводящие к смещению шарниров. Так,  $\delta_x^{(i)}$  определяет в системе координат  $S_i$  смещение по оси  $X_i$  начала системы координат  $S_{i^*}$ , аналогично  $\delta_y^{(i)}$  и  $\delta_z^{(i)}$  определяют соответствующие смещения по осям  $Y_i$  и  $Z_i$ .

$$A_{i,i^*} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{xx}^{(i)} + \alpha_{xx}^{(i)}) & \cos(\varphi_{xy}^{(i)} + \alpha_{xy}^{(i)}) & \cos(\varphi_{xz}^{(i)} + \alpha_{xz}^{(i)}) & l_x^{(i)} + \delta_x^{(i)} \\ \cos(\varphi_{yx}^{(i)} + \alpha_{yx}^{(i)}) & \cos(\varphi_{yy}^{(i)} + \alpha_{yy}^{(i)}) & \cos(\varphi_{yz}^{(i)} + \alpha_{yz}^{(i)}) & l_y^{(i)} + \delta_y^{(i)} \\ \cos(\varphi_{zx}^{(i)} + \alpha_{zx}^{(i)}) & \cos(\varphi_{zy}^{(i)} + \alpha_{zy}^{(i)}) & \cos(\varphi_{zz}^{(i)} + \alpha_{zz}^{(i)}) & l_z^{(i)} + \delta_z^{(i)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{\varphi\alpha}^{(i)} & L_{\delta}^{(i)} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Угловые отклонения являются производными от отклонений формы звеньев, а также перекосов и зазоров, имеющихся внутри шарниров. К отклонениям от теоретической геометрической формы относятся, например, отклонения от плоскостности, прямолинейности, биение цилиндрической поверхности, отклонения профиля резьбы или зубьев. Эти отклонения влияют на относительные направления осей систем координат  $S_i(X_i, Y_i, Z_i)$  и  $S_{i^*}(X_{i^*}, Y_{i^*}, Z_{i^*})$ , связанных со звеном. Так,  $\alpha_{xx}^{(i)}$  определяет угловое отклонение оси  $X_{i^*}$  относительно оси  $X_i$ ,  $\alpha_{xy}^{(i)}$  – угловое отклонение оси  $X_{i^*}$  относительно оси  $Y_i$ . Аналогично определяются и другие угловые отклонения.

При составлении матриц (2) необязательно предварительно определять все 9 угловых отклонений непосредственным их измерением (прямое измерение). Достаточно определить три из них, например два угла, образованные осью  $X_{i^*}$  с осями  $X_i$  и  $Y_i$ , и угол, образованный  $Z_{i^*}$  с осью  $Z_i$ . Остальные 6 угловых отклонений могут быть вычислены решением системы шести нелинейных уравнений (косвенное измерение), отражающих ортонормированность векторов, составляющих как столбцы, так и строки матрицы  $(3 \times 3) M_{\varphi\alpha}^{(i)}$  [2]. Для столбцов свойство ортонормированности векторов позволяет записать систему 6 независимых уравнений:

$$\begin{aligned} & \cos^2(\varphi_{xx}^{(i)} + \alpha_{xx}^{(i)}) + \cos^2(\varphi_{xy}^{(i)} + \alpha_{xy}^{(i)}) + \cos^2(\varphi_{xz}^{(i)} + \alpha_{xz}^{(i)}) = 1; \\ & \cos^2(\varphi_{yx}^{(i)} + \alpha_{yx}^{(i)}) + \cos^2(\varphi_{yy}^{(i)} + \alpha_{yy}^{(i)}) + \cos^2(\varphi_{yz}^{(i)} + \alpha_{yz}^{(i)}) = 1; \\ & \cos^2(\varphi_{zx}^{(i)} + \alpha_{zx}^{(i)}) + \cos^2(\varphi_{zy}^{(i)} + \alpha_{zy}^{(i)}) + \cos^2(\varphi_{zz}^{(i)} + \alpha_{zz}^{(i)}) = 1; \\ & \cos(\varphi_{xx}^{(i)} + \alpha_{xx}^{(i)})\cos(\varphi_{xz}^{(i)} + \alpha_{xz}^{(i)}) + \cos(\varphi_{yx}^{(i)} + \alpha_{yx}^{(i)})\cos(\varphi_{yz}^{(i)} + \alpha_{yz}^{(i)}) + \\ & + \cos(\varphi_{zx}^{(i)} + \alpha_{zx}^{(i)})\cos(\varphi_{zz}^{(i)} + \alpha_{zz}^{(i)}) = 0; \\ & \cos(\varphi_{xx}^{(i)} + \alpha_{xx}^{(i)})\cos(\varphi_{xz}^{(i)} + \alpha_{xz}^{(i)}) + \cos(\varphi_{yx}^{(i)} + \alpha_{yx}^{(i)})\cos(\varphi_{yz}^{(i)} + \alpha_{yz}^{(i)}) + \\ & + \cos(\varphi_{zx}^{(i)} + \alpha_{zx}^{(i)})\cos(\varphi_{zz}^{(i)} + \alpha_{zz}^{(i)}) = 0; \\ & \cos(\varphi_{xy}^{(i)} + \alpha_{xy}^{(i)})\cos(\varphi_{xz}^{(i)} + \alpha_{xz}^{(i)}) + \cos(\varphi_{yy}^{(i)} + \alpha_{yy}^{(i)})\cos(\varphi_{yz}^{(i)} + \alpha_{yz}^{(i)}) + \\ & + \cos(\varphi_{zy}^{(i)} + \alpha_{zy}^{(i)})\cos(\varphi_{zz}^{(i)} + \alpha_{zz}^{(i)}) = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Для решения системы нелинейных уравнений (3) в общем случае необходимо использовать численные методы, позволяющие получить корни с требуемой точностью.

**Отклонения позиционирования.** Помимо первичных отклонений звеньев, связанных в основном с отклонениями их геометрических размеров и формы, существенное влияние на точность многозвенных механических систем оказывают отклонения позиционирования.

Отклонения позиционирования связаны с отклонениями обобщённых координат, называемых иногда шарнирными координатами. Так, в многозвенных механических системах, отражающих структуру исполнительных механизмов манипуляционных роботов, многокоординатных станков, а также других машин, выполняющих транспортные операции внутри своего рабочего пространства, например гидравлических кранов-

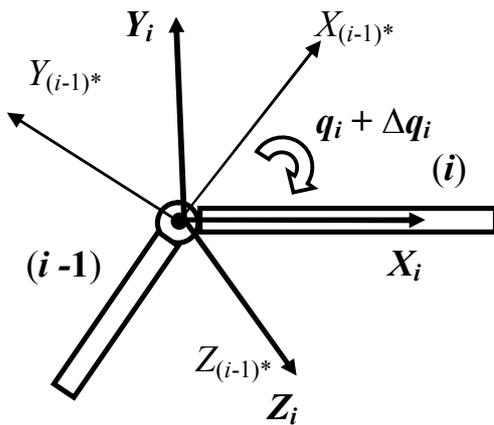


Рис. 5. Отклонение позиционирования по  $i$ -й обобщённой координате

манипуляторов, звенья соединяются между собой шарнирами, имеющими одну степень свободы, последовательно образуя кинематические пары пятого класса [2]. В таких механических системах отклонения позиционирования могут быть представлены как некоторые приращения их обобщённых координат:  $q_{ид} = q_{ин} + \Delta q_i$ , где  $q_{ид}$  – действительное значение  $i$ -й обобщённой координаты;  $q_{ин}$  – программное (заданное) значение  $i$ -й обобщённой координаты, которое в дальнейшем будем обозначать  $q_i$  (без символа «п»);  $\Delta q_i$  – ошибка позиционирования по  $i$ -й обобщённой координате (рис. 5).

С учётом отклонения позиционирования матрица преобразования однородных координат  $A_{(i-1)*,i}$ , определяющая положение системы координат  $S_i$  относительно системы  $S_{(i-1)*}$ , будет иметь вид

$$A_{(i-1)*,i} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_i(q_i + \Delta q_i)) & -\sin(\beta_i(q_i + \Delta q_i)) & 0 & 0 \\ \sin(\beta_i(q_i + \Delta q_i)) & \cos(\beta_i(q_i + \Delta q_i)) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & (1 - \beta_i)(q_i + \Delta q_i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где

$$\beta_i = \begin{cases} 1, & \text{если кинематическая пара вращательная;} \\ 0 & \text{– если поступательная.} \end{cases}$$

Отклонения позиционирования могут иметь различную природу. Ощутимый вклад в эти отклонения вносят зазоры в передаточных механизмах, а также упругая податливость некоторых элементов этих механизмов.

**Определение первичных отклонений.** Рассмотрим определение первичных отклонений звеньев на примере пятикоординатного обрабатывающего центра МС-300 (рис.1), являющегося характерным примером станка с ЧПУ с последовательной многозвенной структурой (рис. 6).

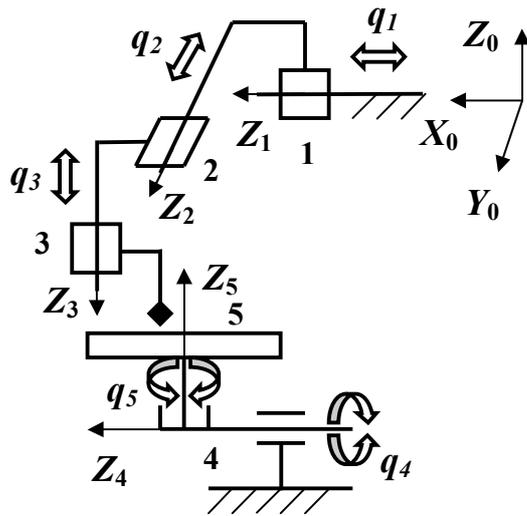


Рис. 6. Структурная схема станка МС-300

Из представленной на рис. 6 структуры видно, что исполнительный механизм станка МС-300 состоит из двух согласованно работающих многозвенных механизмов. Один механизм, обеспечивающий перемещение шпинделя по линейным координатам  $q_1$ ,  $q_2$  и  $q_3$ , состоит из 3 звеньев: 1 – салазки, 2 – стойка, 3 – шпиндель. Второй механизм, обеспечивающий поворот стола по угловым координатам  $q_4$  и  $q_5$ , состоит из 2 звеньев: 4 – корпус планшайбы, 5 – планшайба.

Набор первичных отклонений для двух многозвенных механических систем станка МС-300 состоит из 30 отклонений:

$\alpha_{xx}^{(1)}, \alpha_{xy}^{(1)}, \alpha_{xz}^{(1)}, \alpha_{xx}^{(2)}, \alpha_{xy}^{(2)}, \alpha_{xz}^{(2)}, \alpha_{xx}^{(3)}, \alpha_{xy}^{(3)}, \alpha_{xz}^{(3)}$  – отклонения углового положения узлов станка при движении по линейным координатам механизма перемещения шпинделя (постоянство углового положения);

$\delta_x^{(1)}, \delta_y^{(1)}, \delta_x^{(2)}, \delta_y^{(2)}, \delta_x^{(3)}, \delta_y^{(3)}$  – отклонения от прямолинейности движения вдоль осей  $Z_i$ ,  $i=1, 2, 3$ ;

$\delta_z^{(1)}, \delta_z^{(2)}, \delta_z^{(3)}$  – отклонения геометрических размеров (длины) звеньев механизма перемещения шпинделя;

$\alpha_{xz}^{(4)}, \alpha_{yz}^{(4)}, \alpha_{zz}^{(4)}, \alpha_{xz}^{(5)}, \alpha_{yz}^{(5)}, \alpha_{zz}^{(5)}$  – отклонения от параллельности и перпендикулярности осей поворотного стола (постоянство углового положения);

$\delta_x^{(4)}, \delta_y^{(4)}, \delta_x^{(5)}, \delta_y^{(5)}$  – радиальные биения поворотных столов;

$\delta_z^{(4)}, \delta_z^{(5)}$  – аксиальные биения поворотных столов;

$\Delta q_1, \Delta q_2, \Delta q_3, \Delta q_4, \Delta q_5$  – отклонения позиционирования по линейным и угловым координатам.

Приведенные первичные отклонения двух многозвенных механических систем станка необходимо дополнить 6 первичными отклонениями станины станка, связанными с её изготовлением и износом:

$\alpha_{xz}^{(0)}, \alpha_{yz}^{(0)}, \alpha_{zz}^{(0)}$  – отклонения от параллельности и перпендикулярности направляющих станины (постоянство углового положения);

$\delta_z^{(0)}, \delta_z^{(0)}, \delta_z^{(0)}$  – отклонения геометрических размеров.

Также необходимо контролировать ещё 2 параметра, определяющие отклонения станины от горизонтали и вертикали, возникающие при её монтаже:  $\theta_{x0}^{(0)}, \theta_{z0}^{(0)}$ .

Таким образом, общее число измеряемых параметров, определяющих первичные отклонения станка МС-300, равно 38.

Стоит отметить цикл научных работ [3–6], посвящённых вопросам обеспечения точности многокоординатных станков с ЧПУ. В работе [3] рассмотрены основные направления повышения точности металлорежущих станков. В [4] рассмотрена матричная модель отклонения взаимного положения исполнительных органов многокоординатного станка. В работе [5] рассмотрены методы и средства измерения первичных отклонений звеньев механизмов многокоординатных станков, в [6] – методы и средства измерения интегрального отклонения взаимного положения рабочих органов многокоординатных станков с

ЧПУ. Близкие вопросы рассмотрены в работах зарубежных авторов [7; 8]. В работе [7] представлен обширный список, включающий 146 работ, выполненных за рубежом.

Итак, в статье рассмотрено построение модели геометрических отклонений, описывающей первичные отклонения геометрических параметров звеньев и отклонения позиционирования исполнительных механизмов промышленных роботов и многокоординатных станков с ЧПУ, структура которых представляет собой многосвязную механическую систему. На примере многокоординатного обрабатывающего центра MC-300 рассмотрено определение первичных отклонений звеньев, составляющих несущую систему этого станка.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бруевич, Н.Г. Точность механизмов /Н.Г. Бруевич. – М.; Л.: Гостехиздат, 1946.–332 с.
2. Крахмалев, О.Н. Математическое моделирование динамики манипуляционных систем промышленных роботов и кранов-манипуляторов: монография / О.Н. Крахмалев. – Брянск: БГТУ, 2012. –200 с.
3. Серков, Н.А. Основные направления повышения точности металлорежущих станков / Н.А. Серков // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2010. – №2. – С. 26–35.
4. Серков, Н.А. Модель отклонения взаимного положения исполнительных органов многокоординатного станка / Н.А. Серков // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2011. – №3. – С. 68–78.
5. Серков, Н.А. Методы и средства измерения первичных отклонений звеньев механизмов несущей системы многокоординатных станков с ЧПУ / Н.А. Серков, И.В. Никуличев // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2012. – №2. –С. 43–51.
6. Серков, Н.А. Методы и средства измерения интегрального отклонения взаимного положения рабочих органов многокоординатных станков с ЧПУ / Н.А. Серков // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2012. – №4. – С. 112–124.
7. Moriwaki, T. Multi-functional machine tool / T. Moriwaki // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2008. – №.57. – P. 736–749.
8. Schwenke, H. Geometric error measurement and compensation of machines–An update / H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckenmann, R. Schmitt, F. Delbressine // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2008. – №.57. – P. 660–675.

Материал поступил в редколлегию 21.10.11.