УДК 621.865.8 DOI: 10.17587/mau.16.491-496

**О. Н. Крахмалев,** канд. техн. наук, доц., olegkr64@mail.ru,
Брянский государственный технический университет,
**Д. И. Петрешин,** д-р техн. наук, директор, atsys@tu-bryansk.ru,
Учебно-научный технологический институт Брянского государственного технического университета

# Коррекция интегральных отклонений движения исполнительных механизмов промышленных роботов и многокоординатных станков

*Разработаны методика построения математических моделей многозвенных исполнительных механизмов промышленных роботов и многокоординатных станков, учитывающих первичные отклонения размеров, формы и позиционирования звеньев этих механизмов, а также метод коррекции интегральных отклонений их движения, вызываемых первичными отклонениями.*

***Ключевые слова:*** *первичные отклонения, интегральные отклонения, коррекция отклонений*

## Первичные отклонения размеров и формы

В промышленных роботах и многокоординатных станках исполнительные механизмы представляют собой многозвенные механические системы с последовательной кинематической структурой, звенья которых связываются между собой шарнирами пятого класса и моделируются твердыми телами (рис. 1).

При изготовлении и сборке деталей и узлов, составляющих звенья многозвенных механических систем, неизбежны отклонения их геометрических размеров и формы, которые принято называть первичными. Наличие первичных геометрических отклонений приводит к отличию параметров движения реального механизма от параметров движения его идеальной модели, построенной на основе конструкторской документации (3D-модели) [1]. В целях повышения точности управления движением реального механизма необходимо выполнить коррекцию его идеальной модели с учетом измерения первичных геометрических отклонений звеньев этого механизма.

Первичные геометрические отклонения звеньев в математических моделях многозвенных механических систем можно учесть при описании преобразований координат между связываемыми с каждым звеном системами координат.

При использовании двух систем координат $S_i$ и $S_{i*}$, $i = 1...n$, связываемых с центрами шарниров каждого звена (рис. 2), 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. 3), 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).

Введенные линейные отклонения отражают отклонения геометрических размеров звеньев, при-

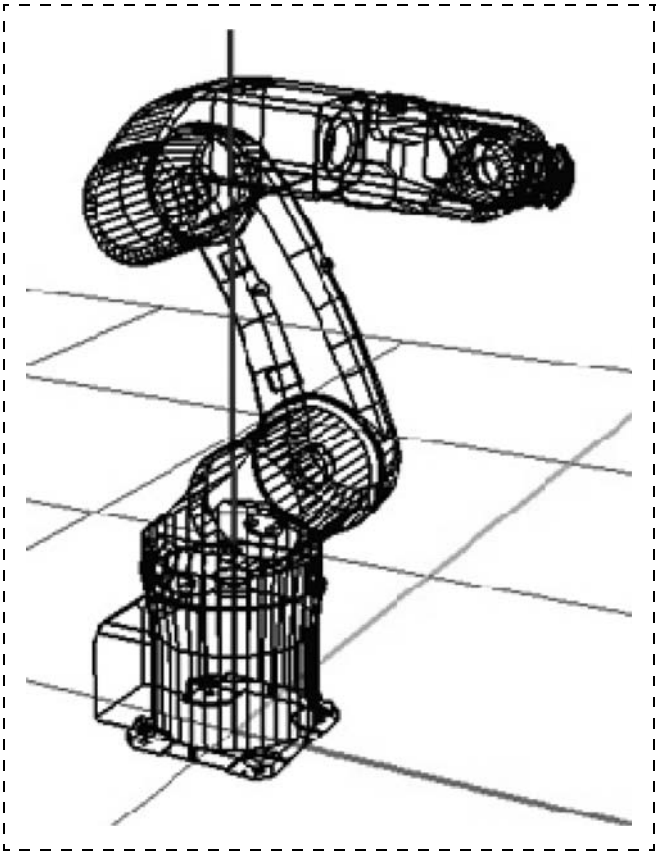

**Рис. 1. Кинематическая структура промышленного робота**

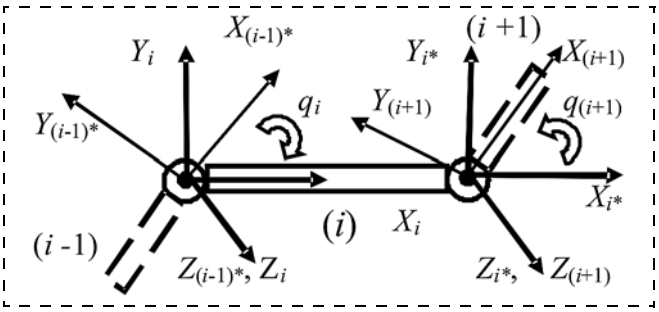


**Рис. 2. Связываемые системы координат $S_i(X_i, Y_i, Z_i)$ и $S_{i*}(X_{i*}, Y_{i*}, Z_{i*})$**

водящие к смещению центров 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 $Z_i$.

Угловые отклонения отражают отклонения формы звеньев и влияние 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.

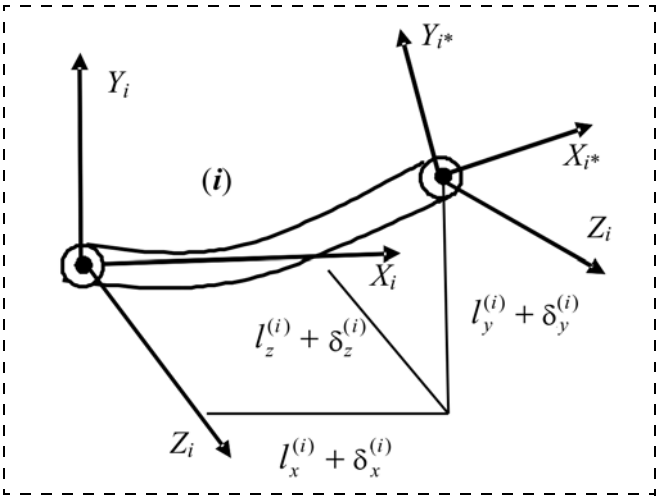


**Рис. 3. Первичные отклонения звена**

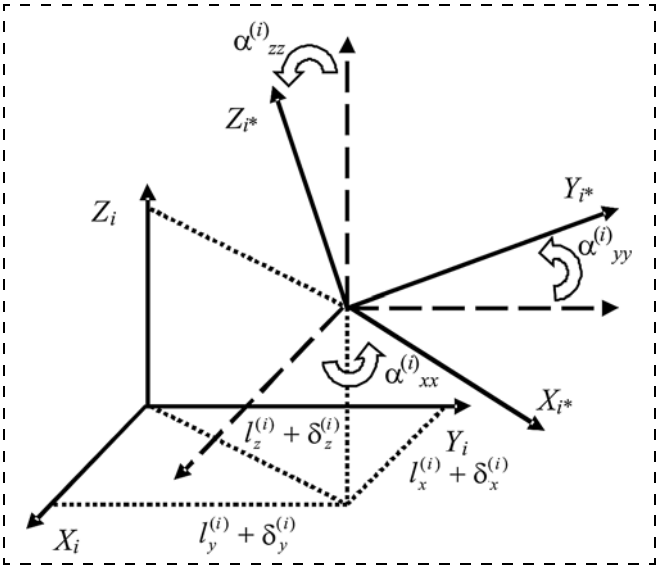


**Рис. 4. Угловые отклонения**

С учетом первичных отклонений звеньев матрица $A_{i,i*}$, отражающая преобразование однородных координат из системы $S_{i*}$ в систему $S_i$, совмещающая поворот и параллельный перенос, будет иметь вид [2]

$$\widetilde{A}_{i,\,i*} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_{xx}^{(i)}) & \cos(\alpha_{xy}^{(i)}) & \cos(\alpha_{xz}^{(i)}) & l_x^{(i)} + \delta_x^{(i)} \\ \cos(\alpha_{yx}^{(i)}) & \cos(\alpha_{yy}^{(i)}) & \cos(\alpha_{yz}^{(i)}) & l_y^{(i)} + \delta_x^{(i)} \\ \cos(\varphi\alpha_{zx}^{(i)}) & \cos(\alpha_{zy}^{(i)}) & \cos(\alpha_{zz}^{(i)}) & l_z^{(i)} + \delta_x^{(i)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \overset{(3\times3)}{\widetilde{M}_i} & \overset{(3\times1)}{\widetilde{L}_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \qquad (1)$$

Знак волны над матрицами в выражении (1) означает, что матрицы скорректированы с учетом первичных геометрических отклонений.

При составлении матриц $A_{i,i*}$ необязательно предварительно определять все девять 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 шесть угловых отклонений могут быть вычислены решением системы шести нелинейных уравнений (косвенное измерение), отражающих ортонормированность векторов, составляющих как столбцы, так и строки матрицы (3 × 3) $\widetilde{M}_i$.

### 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 обобщенных координат, называемых иногда шарнирными координатами. Так, в многозвенных механических системах, отражающих структуру исполнительных механизмов манипуляционных роботов и многокоординатных станков, звенья последовательно соединяются друг с другом шарнирами, имеющими одну степень свободы, образуя кинематические пары пятого класса. В таких механических системах отклонения позиционирования могут быть представлены как некоторые приращения их обобщенных координат: $q_{i\text{д}} = q_{i\text{п}} + \Delta q_i$, где $q_{i\text{д}}$ — действительное значение $i$-й обобщенной координаты; $q_{i\text{п}}$ — программное (заданное) значение $i$-й обобщенной координаты, которое в дальнейшем будем обозначать $q_i$ (без символа "п"); $\Delta q_i$ — ошибка позиционирования по $i$-й обобщенной координате (рис. 5).

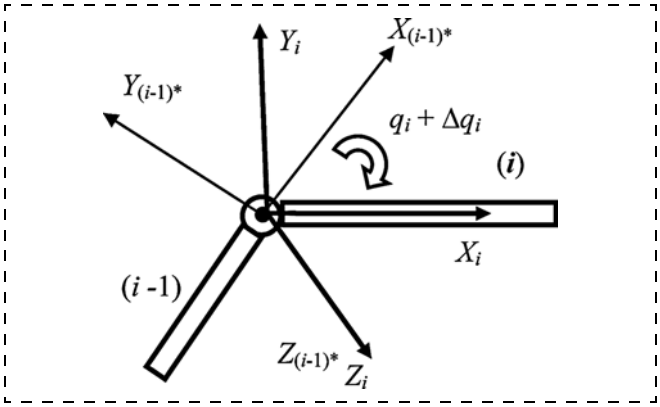


**Рис. 5. Отклонение позиционирования по *i*-й обобщенной координате**

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

$$\widetilde{A}_{(i-1)^*,\,i} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\beta_i(q_i+\Delta q_i)) & -\sin(\beta_i(q_i+\Delta q_i)) & 0 & 0 \\ \sin(\beta_i(q_i+\Delta q_i)) & \cos(\beta_i(q_i+\Delta q_i)) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & (1-\beta_i)(q_i+\Delta q_i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

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.

Матрица $A_{(i-1),\,i}$, определяющая относительное положение двух соседних звеньев, может быть представлена произведением матриц:

$$A_{(i-1),\,i} = A_{(i-1),\,(i-1)^*} A_{(i-1)^*,i}. \quad (3)$$

Матрица преобразования однородных координат из системы $S_k$, связанной с $k$-м звеном, в неподвижную систему $S_0$ может быть определена как последовательность произведений матриц $A_{(i-1),\,i}$, $i = 1...k$:

$$A_{0,k} = A_{0,1}A_{1,\,2}...A_{(i-1),i}A_{i,(i+1)}...A_{(k-1),k} =$$

$$= \prod_{i=1}^{k} A_{(i-1),\,i}. \quad (4)$$

Матричные выражения (1)—(4) представляют собой математическую (геометрическую) модель манипуляционных систем, параметризованную на основе первичных геометрических отклонений их звеньев и отклонений позиционирования, возникающих в шарнирах. Эти отклонения определяются на конкретном образце путем проведения измерений современными метрологическими методами.

## Определение первичных отклонений

Определение первичных отклонений звеньев рассмотрим на примере пятикоординатного обрабатывающего центра МС-300 (рис. 6). Из представленной на рис. 7 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 трех звеньев: *1* — салазки; *2* — стойка; *3* — шпиндель. Второй механизм, обеспечивающий поворот стола по угловым координатам $q_4$ и $q_5$, состоит из двух звеньев: *4* — корпус планшайбы; *5* — планшайба.

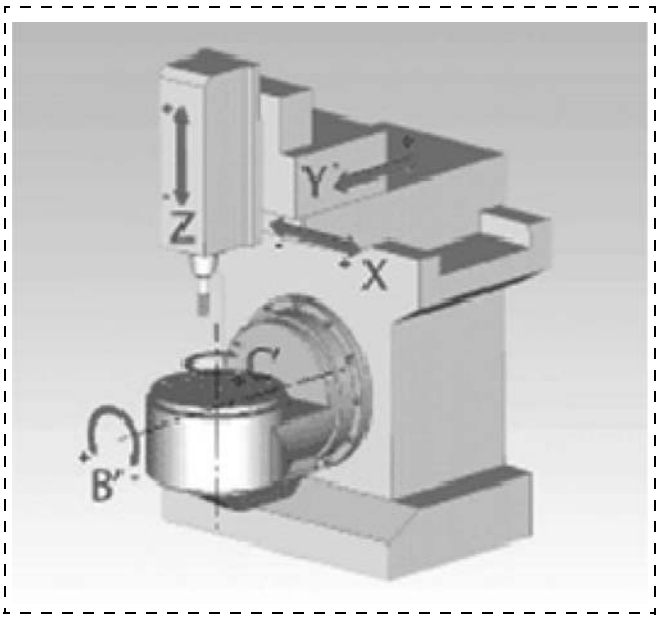


**Рис. 6. Кинематическая структура станка МС-300**

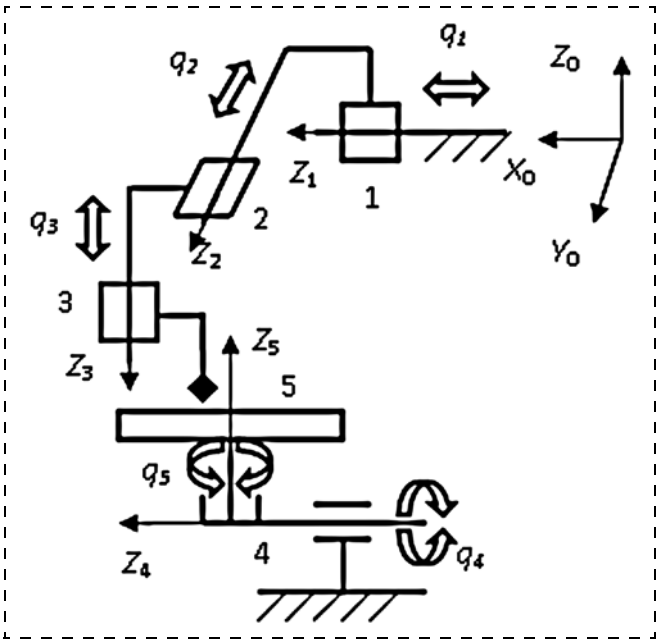


**Рис. 7. Структурная схема**

Набор первичных отклонений для двух многозвенных механических систем станка МС-300 состоит из тридцати первичных отклонений размеров и формы звеньев и пяти отклонений позиционирования:

- $\alpha_{xx}^{(1)}, \alpha_{xy}^{(1)}, \alpha_{xz}^{(1)}, \alpha_{xx}^{(2)}, \alpha_{xy}^{(2)}, \alpha_{xz}^{(2)}, \alpha_{xx}^{(3)}, \alpha_{xy}^{(3)}, \alpha_{xz}^{(3)}$ — 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 поворотного стола;
- $\delta_z^{(4)}, \delta_z^{(5)}$ — аксиальные биения поворотного стола;
- $\Delta q_1, \Delta q_2, \Delta q_3, \Delta q_4, \Delta q_5$ — отклонения позиционирования по линейным и угловым координатам.

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

- $\alpha_{xz}^{(0)}, \alpha_{yz}^{(0)}, \alpha_{zz}^{(0)}$ — отклонения от параллельности и перпендикулярности направляющих станины (постоянство углового положения);
- $\delta_x^{(0)}, \delta_y^{(0)}, \delta_z^{(0)}$ — отклонения геометрических размеров.

Указанные первичные геометрические отклонения могут быть определены современными метрологическими методами.

### Интегральные отклонения

Предложенные математические модели (1)—(4), учитывающие первичные отклонения геометрических параметров звеньев в многозвенных механических системах с последовательной структурой, могут быть использованы для определения интегральных отклонений положения звеньев, возникающих из-за накопления ошибок положения каждого предыдущего звена кинематической цепи. Под интегральными отклонениями многозвенных механических систем следует понимать отклонения траекторий движения характерных точек их звеньев и отклонения ориентации звеньев от заданной, вызванные наличием первичных геометрических отклонений и отклонений позиционирования, определенных ранее.

Положение любой точки в пространстве можно определить радиус-вектором этой точки в неподвижной системе координат. В многозвенных механических системах, имеющих последовательную структуру, радиус-вектор $r$ точки начала системы координат $S_п$ конечного звена в неподвижной системе координат $S_0$ (рис. 8) может быть задан выражением

$$r = A_{0,n} r_o,\ r_o = [0\ 0\ 0\ 1]^{\text{т}}.$$

С учетом первичных геометрических отклонений интегральное отклонение траектории $\Delta r(q)$ можно задать выражением, представляющим разность между действительным положением, определяемым радиус-вектором $\tilde{r}$, и программным положением, определяемым радиус-вектором $r$:

$$\Delta r = \tilde{r} - r,\ \tilde{r} = \tilde{A}_{0,n} r_o,$$

$$\Delta r(q) = (\tilde{A}_{0,n} - A_{0,n}) r_o = \begin{Bmatrix} i_0^{\text{т}}(\tilde{A}_{0,n} - A_{0,n}) r_o \\ j_0^{\text{т}}(\tilde{A}_{0,n} - A_{0,n}) r_o \\ k_0^{\text{т}}(\tilde{A}_{0,n} - A_{0,n}) r_o \end{Bmatrix}, \quad (5)$$

$$i_0^{\text{т}} = [1\ 0\ 0\ 0],\ j_0^{\text{т}} = [0\ 1\ 0\ 0],\ k_0^{\text{т}} = [0\ 0\ 1\ 0].$$

Аналогично может быть определено интегральное отклонение, связанное с ориентацией, задаваемое вектором $\Delta e(q)$:

$$\Delta e(q) = \begin{Bmatrix} i_0^{\text{т}}(\tilde{A}_{0,n} - A_{0,n}) j_n \\ i_0^{\text{т}}(\tilde{A}_{0,n} - A_{0,n}) k_n \\ j_0^{\text{т}}(\tilde{A}_{0,n} - A_{0,n}) k_n \end{Bmatrix}, \quad (6)$$

$$j_n = [0\ 1\ 0\ 0]^{\text{т}},\ k_n = [0\ 0\ 1\ 0]^{\text{т}}.$$

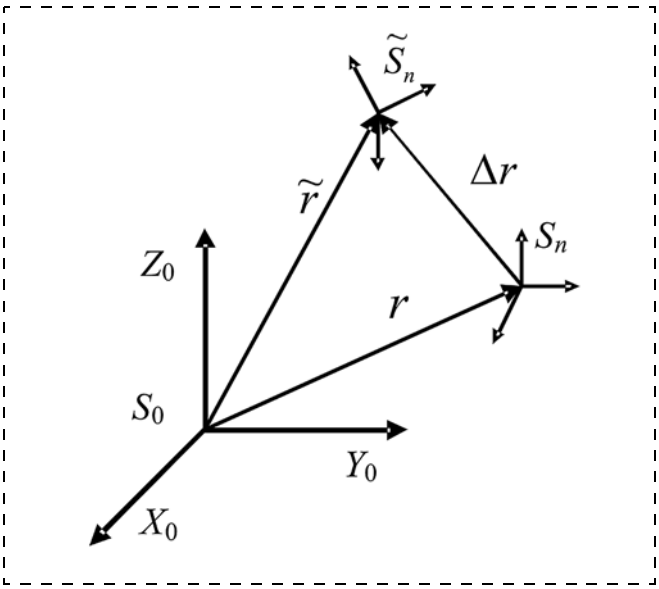


**Рис. 8. Интегральное отклонение**

Совместно интегральные отклонения положения могут быть определены комбинированным вектором $[\Delta r, \Delta e]^{\mathrm{T}}$.

Таким образом, траектория движения рабочего органа реального промышленного робота будет отличаться от заданной программной траектории на вектор интегральных отклонений положения конечного звена (рис. 9). Следует иметь в виду, что законы движения промышленных роботов и многокоординатных станков в форме законов изменения обобщенных координат $q(t)$ их исполнительных механизмов разрабатываются для конкретных моделей этого оборудования. Поэтому возникает вопрос об использовании уже разработанных ранее программ управления движением различных моделей промышленных роботов или многокоординатных станков с возможностью компенсации интегральных отклонений движения конкретного образца, обусловленных его индивидуальными отклонениями геометрических размеров и формы.

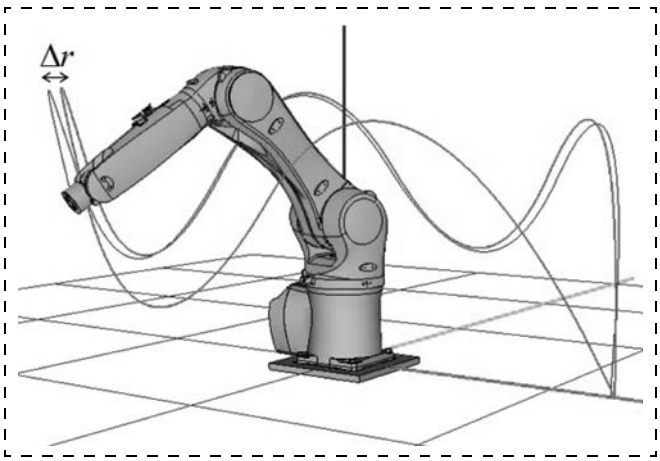


**Рис. 9. Иллюстрация интегральных отклонений**

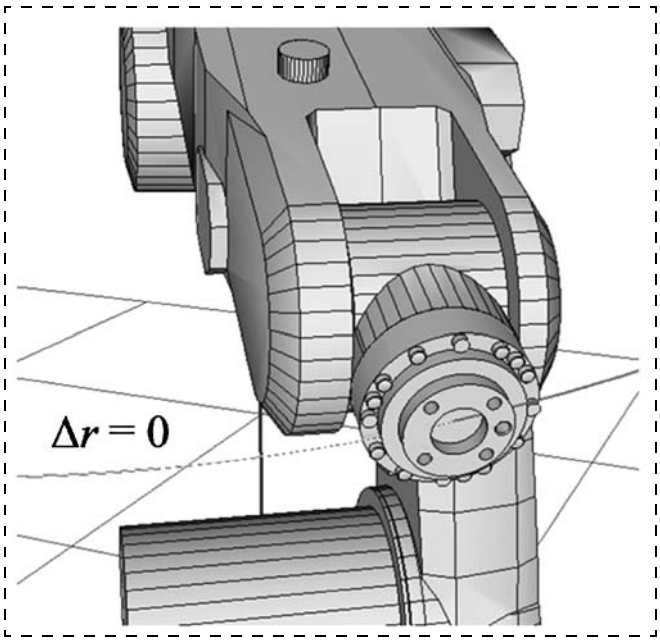


**Рис. 10. Коррекция интегральных отклонений**

Для получения законов движения исполнительных механизмов, соответствующих конкретным образцам оборудования, предложен метод коррекции интегральных отклонений движения исполнительных механизмов промышленных роботов и многокоординатных станков. Метод основывается на разработанных математических моделях (1)—(4). Использование идеальных $A_{0,k}$ и корректированных $\widetilde{A}_{0,k}$ геометрических моделей в выражениях (5) и (6) позволяет записать условие компенсации интегральных отклонений в форме

$$\left\{ \begin{array}{c} \Delta r(q) \\ \Delta e(q) \end{array} \right\} = 0 \rightarrow \widetilde{q}\,. \qquad (7)$$

Решение системы нелинейных уравнений (7) дает необходимые законы движения исполнительного механизма конкретного образца промышленного робота или многокоординатного станка, обеспечивающие его движение по заданной программной траектории (рис. 10). Использование математического обеспечения, реализующего данный метод коррекции, в системах автоматического управления промышленных роботов и многокоординатных станков позволит повысить их кинематическую точность. Близкие по данной теме вопросы рассмотрены в работах [3—11].

**Список литературы**


1. **Бруевич Н. Г.** Точность механизмов. М.; Л.: Гостехиздат, 1946. 332 с.
2. **Крахмалев О. Н.** Математическое моделирование динамики манипуляционных систем промышленных роботов и кранов-манипуляторов. Брянск: БГТУ, 2012. 200 с.
3. **Крахмалев О. Н.** Первичные отклонения геометрических параметров многозвенных механических систем промышленных роботов и станков с ЧПУ // Вестник Брянского государственного технического университета. 2014. № 4. С. 52—57.
4. **Крахмалев О. Н.** Исследование малых отклонений от программных движений манипуляционных систем с упругой податливостью, сосредоточенной в сочленениях звеньев // Вестник Брянского государственного технического университета. 2011. № 4. С. 39—46.
5. **Крахмалев О. Н., Блейшмидт Л. И.** Определение динамической точности манипуляционных систем роботов с упругими шарнирами // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 1. С. 29—36.
6. **Серков Н. А.** Основные направления повышения точности металлорежущих станков // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2010. № 2. С. 26—35.
7. **Серков Н. А.** Модель отклонения взаимного положения исполнительных органов многокоординатного станка // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 3. С. 68—78.
8. **Серков Н. А., Никуличев И. В.** Методы и средства измерения первичных отклонений звеньев механизмов несущей системы многокоординатных станков с ЧПУ // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2012. № 2. С. 43—51.
9. **Серков Н. А.** Методы и средства измерения интегрального отклонения взаимного положения рабочих органов многокоординатных станков с ЧПУ // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2012. № 4. С. 112—124.
10. **Moriwaki T.** Multi-functional machine tool // CIRP Annals — Manufacturing Technology. 2008. № 57. P. 736—749.
11. **Schwenke H., Knapp W., Haitjema H., Weckenmann A., Schmitt R., Delbressine F.** Geometric error measurement and compensation of machines — An update // CIRP Annals — Manufacturing Technology. 2008. № 57. P. 660—675.

# Correction of Integrated Motion Deviations of Industrial Robots and Multi-Axis Machine Tools

**O. N. Krakhmalev,** olegkr64@mail.ru, **D. I. Petreshin,** atsys@tu-bryansk.ru,
Bryansk State Technical University, Bryansk, 241036, Russian Federation

*Corresponding author:* **Krakhmalev Oleg N.,** Ph. D. Associate Professor,
Bryansk State Technical University, Bryansk, 241035, Russian Federation,
e-mail: olegkr64@mail.ru

*Received on March 13, 2015*
*Accepted March 31, 2015*

*A method was developed for construction of mathematical models, which describe the geometry of the industrial robots and multi-axis machine tools. This method takes into account the primary deviations in size, shape and location. Primary deviations occur during manufacture of the industrial robots and multi-axis machine tools. Such deviations can be measured. For this purpose modern metrology methods may be used. A method was developed for correction of the integrated deviations in the industrial robots and multi-axis machine tools. The method allows us to offset the effect of the primary geometric deviations. The method ensures a coincidence of the trajectories of real industrial robots and multi-axis machine tools and their ideal models. The task is reduced to solving of a system of nonlinear equations. For this purpose modern numerical methods may be applied. These methods can improve the accuracy control of the industrial robots and multi-axis machine tools. Determination of the primary deviations is presented on the example of a five-axis machine tool. On the basis of a kinematic scheme of a machine tool, the following deviations were revealed. Deviation of the angular position of the spindle machine tool during its movement. Deviation from the straightness of motion along the specified axes. Deviation of the lengths of the links of the movement mechanism of the spindle. Deviations from the parallelism and perpendicularity to the axes of the turntable. Radial run out of the turntable. Axial runout of the turntable. Deviations in positioning by the linear and angular coordinates. Deviations from the parallelism and perpendicularity to the frame guides. References are made to the works of the other researchers.*

***Keywords:*** *primary deviations; integrated deviations, correction of deviations*

For citation:

**Krakhmalev O. N., Petreshin D. I.** Correction of Integrated Motion Deviations of Industrial Robots and Multi-Axis Machine Tools, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 491—496.

DOI: 10.17587/mau.16.491-496

## References

1. **Bruevich N. G.** *Tochnost' mekhanizmov* (The accuracy of the machinery). Moscow, Leningrad, Gostekhizdat, 1946, 332 p. (in Russian).

2. **Krakhmalev O. N.** *Matematicheskoe modelirovanie dinamiki manipulyatsionnykh sistem promyshlennykh robotov i kranov-manipulyatorov* (Mathematical modeling of dynamics of manipulation systems industrial robots and truck mounted cranes), Bryansk, published by BGTU, 2012, 200 p. (in Russian).

3. **Krakhmalev O. N.** *Pervichnye otkloneniya geometricheskikh parametrov mnogozvennykh mekhanicheskikh sistem promyshlennykh robotov i stankov s ChPU* (Primary deviations geometrical parameters multilink mechanical systems industrial robots and CNC machine tools), *Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta,* 2014, no. 4, pp. 52—57 (in Russian).

4. **Krakhmalev O. N.** *Issledovanie malykh otklonenii ot programmnykh dvizhenii manipulyatsionnykh sistem s uprugoi podatlivost'yu, sosredotochennoi v sochleneniyakh zven'ev* (Study of small deviations from the program motions of manipulation systems with elastic compliance, concentrated in the hinges links.), *Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta,* 2011, no. 4, pp. 39—46 (in Russian).

5. **Krakhmalev O. N., Bleishmidt L. I.** *Opredelenie dinamicheskoi tochnosti manipulyatsionnykh sistem robotov s uprugimi sharnirami* (Determination of Dynamic Accuracy of Manipulation Systems of Robots with Elastic Hinges), *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*, 2014, no. 1, pp. 29—36 (in Russian).

6. **Serkov N. A.** *Osnovnye napravleniya povysheniya tochnosti metallorezhushchikh stankov* (Trends accuracy improvement of machine tools, Problems of mechanical engineering and automation), *Problemy Mashinostroeniya i Avtomatizatsii,* 2010, no. 2, pp. 26—35 (in Russian).

7. **Serkov N. A.** *Model' otkloneniya vzaimnogo polozheniya ispolnitel'nykh organov mnogokoordinatnogo stanka* (Model deviation of the relative position of the executive bodies of multiaxis machine tool), *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin,* 2011, no. 3, pp. 68—78 (in Russian).

8. **Serkov N. A., Nikulichev I. V.** *Metody i sredstva izmereniya pervichnykh otklonenii zven'ev mekhanizmov nesushchei sistemy mnogokoordinatnykh stankov s ChPU* (Methods measurement and tools of primary deviations for carrying system's mechanisms of multicoordinate CNC machine tools), *Problemy Mashinostroeniya i Avtomatizatsii,* 2012, no. 2, pp. 43—51 (in Russian).

9. **Serkov N. A.** *Metody i sredstva izmereniya integral'nogo otkloneniya vzaimnogo polozheniya rabochikh organov mnogokoordinatnykh stankov s ChPU* (Methods and measurement tools of relative position of the executive bodies of multiaxis CNC machine tools), *Problemy Mashinostroeniya i Avtomatizatsii,* 2012, no. 4, pp. 112—124 (in Russian).

10. **Moriwaki T.** Multifunctional machine tool, *CIRP Annals — Manufacturing Technology,* 2008, no. 57, pp. 736—749.

11. **Schwenke H., Knapp W., Haitjema H., Weckenmann A., Schmitt R., Delbressine F.** Geometric error measurement and compensation of machines — An update, *CIRP Annals — Manufacturing Technology,* 2008, no. 57, pp. 660—675.