

При відсутності вимкнень магнітної корекції (лінія 1), під час дії магнітного збурення значення кута курсу відхилилось від істинного до  $9^\circ$ . При використанні запропонованого алгоритму вимкнення корекції, як видно з графіка (лінія 2), після початку дії магнітного збурення корекція ДКШ вимикається і, відповідно до розрахунку (14), протягом часу  $t_3 = 3,5$  с значення кута курсу відповідає істинному. Після закінчення часу  $t_3$  з'являється похибка внаслідок ввімкнення магнітної корекції, проте після припинення дії магнітного збурення похибка поступово зникає.

### **Висновки**

У результаті проведених досліджень запропоновано алгоритм підвищення точності гіромагнітної курсовертикалі за наявності магнітних збурень за рахунок використання смугового фільтру. Наведені результати експериментальних досліджень вимкнення корекції ДКШ підтверджують ефективність алгоритму і правильність розрахунків порогу та постійних часу смугового фільтру.

Подальші дослідження передбачається проводити в напрямі можливості застосування попередньої смугової фільтрації складових магнітного поля Землі з наступним розрахунком його модуля.

### **Література**

1. Одинцов А. А. Теория и расчет гироскопических приборов / А. А. Одинцов. – К.: Вища школа, 1985. – 392 с.
2. Бесекекерский В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекекерский, Е. П. Попов. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
3. Изерман Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. – М: Мир, 1984. – 541 с.
4. Нестеренко О. И. Разработка малогабаритных систем ориентации в компании Inertial Labs, USA / О. И. Нестеренко // Гиротехнологии, навигация, управление движением и конструирование авиационно-космической техники: междунар. научн.-техн. конф., 21-22 апр. [2011г.]. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – С. 117 – 124.
5. Attitude and Heading Reference System datasheet. – Режим доступу: <http://www.inertiallabs.com/downloads/new/AHRS-Datasheet.rev1.5Oct2013.pdf>.

*Надійшла до редакції  
5 березня 2014 року*

© Клішта А. В, Нестеренко О. І., 2014

УДК 621.757

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СБОРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ ОТНОСИТЕЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ ОСЕЙ СОЕДИНЯЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКЕ**

*Кузнецова С. В., Симаков А. Л., Пантелеев Е. Ю.  
ФГБОУ ВПО “Ковровская государственная технологическая академия  
им. В. А. Дегтярева”, г. Ковров, Россия*

*Рассмотрена задача определения величины относительного смещения осей соединяемых*

деталей в условиях автоматизированной сборки. Изложена методика точностного анализа конструкции устройства для сборки осесимметричных деталей, основанная на базе матричного метода в трехмерном пространстве. Выполнены практические расчеты величины относительного смещения осей в сборочном оборудовании. Проведен анализ влияния параметров сборочного оборудования на точность совмещения осей соединяемых деталей. С помощью изложенной методики может быть осуществлена проверка условий собираемости узла.

**Ключевые слова:** автоматизированная сборка, сборочное оборудование, относительное смещение осей, матричный метод, точность совмещения, условия собираемости.

## Введение

В современных условиях эффективным средством интенсификации производства при повышении качественных показателей продукции и снижении ее себестоимости являются механизация и автоматизация технологических операций. Возможность автоматизации сборочных операций в значительной мере определяется точностными требованиями, предъявляемыми к собираемому узлу, точностью изготовления сопрягаемых поверхностей и погрешностями сборочного оборудования.

Погрешности сборочного оборудования зависят от структуры механизмов перемещений деталей, деформаций звеньев, степени износа кинематических пар и т.п. Надежная автоматизированная сборка деталей, сопрягаемых по цилиндрическим поверхностям, неосуществима без точного совмещения сопрягаемых поверхностей. Поэтому точностной анализ сборочного оборудования является актуальной задачей.

## Постановка задачи

Существующие методы определения погрешностей пространственных механизмов основаны на аналитических вычислениях, геометрических построениях, либо на их сочетании. Анализ погрешностей механизмов может быть выполнен на базе совместного использования элементов теории конечных пере-

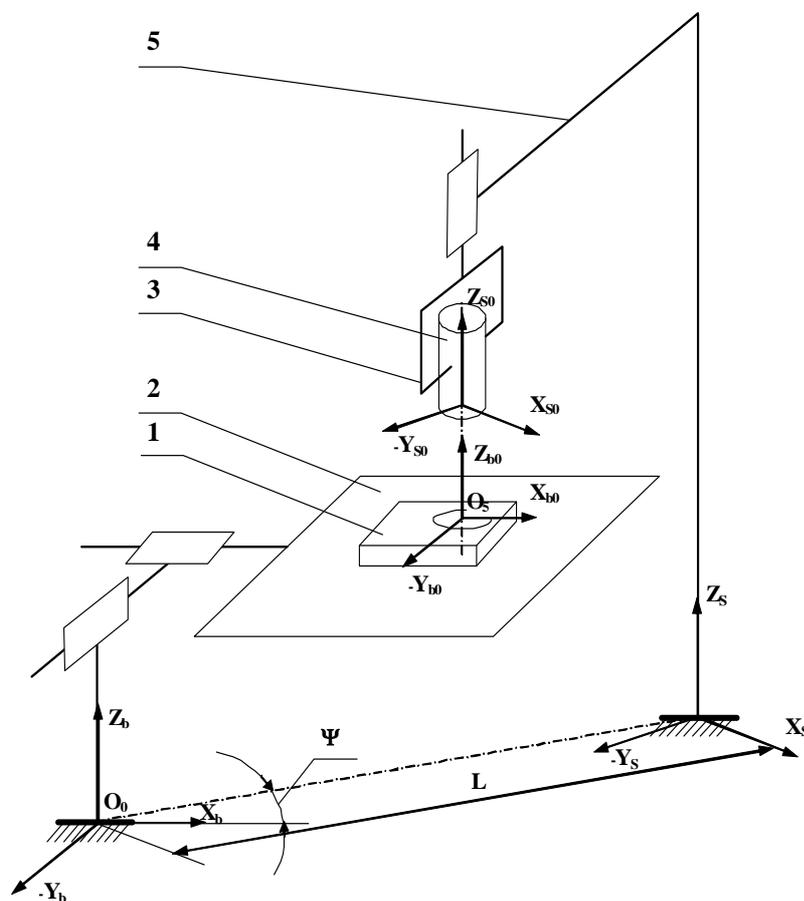


Рис. 1. Обобщенная схема технологического сборочного оборудования

мещений с элементами винтового исчисления [1]. Однако, данный метод пока не получил широкого распространения из-за редкости используемого математического аппарата теории винтов.

Наиболее эффективными методами решения задач точностного анализа являются матричные методы. Матричные методы определения погрешностей базируются на построении кинематических схем механизмов, с последующим решением систем векторных уравнений. Они основаны на преобразовании либо однородных координат в трехмерном пространстве (применение матриц размера  $4 \times 4$ ), либо дуальных координат (применение матриц-верзоров размера  $3 \times 3$ ).

При помощи матричного метода определим точность положения осей сопрягаемых поверхностей соединяемых деталей в сборочном оборудовании. Проведем анализ влияния параметров сборочного оборудования на величину относительного смещения осей соединяемых деталей.

### Конструкция анализируемого сборочного устройства

Рассмотрим конструкцию сборочного устройства с горизонтальным подающим устройством поступательного движения узла и вертикально расположенным исполнительным органом сборочного автомата [2] и определим точность положения осей сопрягаемых поверхностей соединяемых деталей.

На рис. 1 и рис. 2 представлена обобщенная кинематическая схема технологического сборочного оборудования рассматриваемого варианта, где 1 – собираемый узел; 2 – подающее устройство поступательного движения; 3 – исполнительный орган сборочного автомата; 4 – устройство установки присоединяемой детали (например, устанавливающее устройство или штифтоверт); 5 – станина сборочного оборудования.

### Матричный метод определения относительного смещения осей соединяемых деталей

Выберем систему отсчета и обозначим параметры подающего устройства (рис. 3):

- $O_0X_0Y_0Z_0$  – неподвижная система отсчета;
- $O_1X_1Y_1Z_1$ ,  $O_2X_2Y_2Z_2$  – системы отсчета, связанные с направляющими поступательного движения в горизонтальной плоскости;

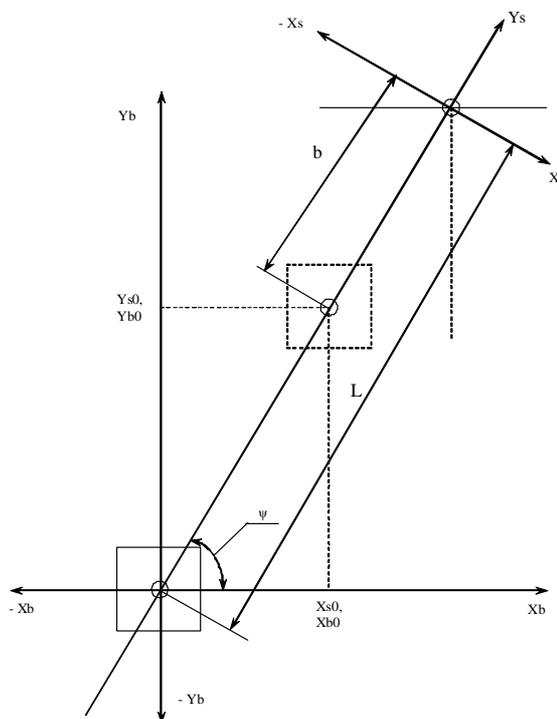


Рис. 2. Относительное расположение элементов сборочного оборудования

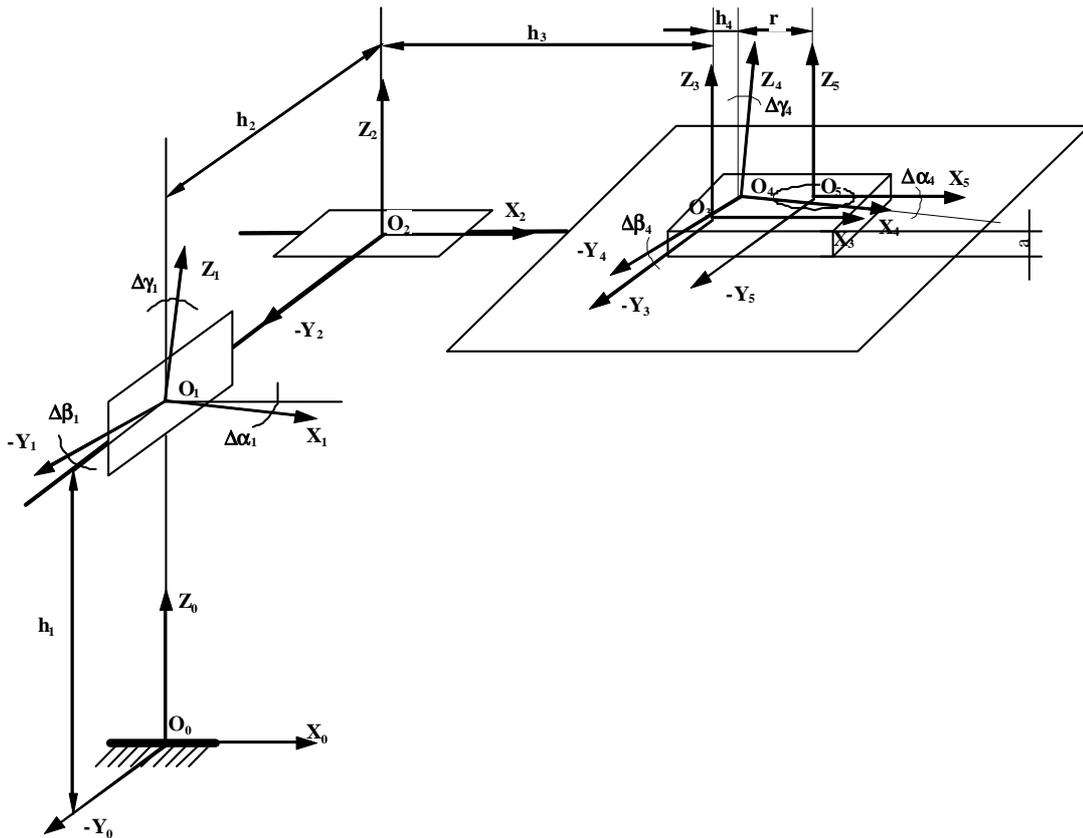


Рис. 3. Кинематическая схема подающего устройства поступательного движения

- $O_3X_3Y_3Z_3$  – система отсчета механизма крепления узла к подающему устройству;
- $O_4X_4Y_4Z_4$  – система отсчета базирования узла в устройстве крепления;
- $O_5X_5Y_5Z_5$  – система отсчета, связанная с собираемым узлом;
- $h_1$  – расстояние от неподвижной системы отсчета до направляющей;
- $h_2$  – расстояние между направляющими;
- $h_3$  – расстояние от направляющей до устройства крепления узла;
- $h_4$  – расстояние от системы отсчета крепления узла до системы отсчета, связанной с узлом;
- $a$  – высота собираемого узла;
- $r$  – размер, определяющий положение сопрягаемой поверхности собираемого узла.

Номинальное положение сопрягаемой поверхности узла относительно неподвижной системы отсчета  $O_0x_0y_0z_0$ , в соответствии с [3], определяется вектором:

$$\bar{R}_{b0} = B_{sd}(\bar{k}_0, h_1)B_{sd}(\bar{j}_1, h_2)B_{sd}(\bar{i}_2, h_3)B_{sd}(\bar{i}_3, h_4)B_{sd}(\bar{i}_4, r)B_{sd}(\bar{k}_5, a)r_{b0}, \quad (1)$$

где  $B_{sd}(\bar{k}_0, h_1)$  – матрица перехода от системы отсчета  $O_1X_1Y_1Z_1$  к системе  $O_0X_0Y_0Z_0$ ;  $B_{sd}(\bar{j}_1, h_2)$  – матрица перехода системы отсчета  $O_2X_2Y_2Z_2$  к системе  $O_1X_1Y_1Z_1$ ;  $B_{sd}(\bar{i}_2, h_3)$  – матрица перехода от системы  $O_3x_3y_3z_3$  к системе  $O_2x_2y_2z_2$ ;  $B_{sd}(\bar{i}_3, h_4)$  – матрицы перехода от системы  $O_3X_4Y_4Z_4$  к системе  $O_3X_3Y_3Z_3$ ;  $\hat{A}_{sd}(\bar{i}_4, r)$  – матрица перехода от системы  $O_5X_5Y_5Z_5$  к системе  $O_3X_4Y_4Z_4$ ;  $B_{sd}(\bar{k}_5, a)$  – матрица сдвига вдоль оси  $Z_5$ ;  $R_{b0}$  и  $r_{b0}$  – матрицы-столбцы размером  $4 \times 1$ , первые три элемента которых – это координаты произвольной точки сопрягаемой поверхности узла соответственно в координатах  $n$  и  $0$ .

Координаты номинального положения сопрягаемой поверхности собираемого узла в подающем устройстве (рис. 3)

$$\begin{cases} x_{b0} = h_3 + h_4 + r \\ y_{b0} = h_2 \\ z_{b0} = h_1 + a \end{cases} \quad (2)$$

Найдем положение сопрягаемой поверхности узла относительно неподвижной системы отсчета  $O_0X_0Y_0Z_0$  с учетом погрешностей изготовления и сборки подающего устройства (рис.3), где  $O_0X_0Y_0Z_0$  – неподвижная система отсчета;  $O_1X_1Y_1Z_1$  – система отсчета, связанная с направляющими горизонтального перемещения и определяющая неперпендикулярность оси к горизонтальной плоскости  $O_0X_0Y_0$ ;  $O_2X_2Y_2Z_2$  – система отсчета стола, определяющая непараллельность плоскости стола к горизонтальной плоскости  $O_0X_0Y_0$  и разворот осей  $x_0$  к  $x_1$  или  $y_0$  к  $y_1$ ;  $O_3X_3Y_3Z_3$  – система отсчета механизма крепления узла к подающему столу;  $O_4X_4Y_4Z_4$  – система отсчета, учитывающая погрешность базирования узла в устройстве крепления;  $O_5X_5Y_5Z_5$  – система отсчета, связанная с собираемым узлом;  $\Delta h_1$  – погрешность расстояния от неподвижной системы отсчета до плоскости стола;  $\Delta h_2, \Delta h_3$  – погрешность расстояния от системы отсчета  $O_1X_1Y_1Z_1$  до системы отсчета  $O_3X_3Y_3Z_3$ ;  $\Delta h_4$  – погрешность расстояния от системы отсчета крепления узла  $O_3X_3Y_3Z_3$  до системы отсчета, связанной с узлом;  $\Delta r$  – погрешность на размер, определяющий положение сопрягаемой поверхности узла (допуск на размер);  $\Delta a$  – погрешность расстояния от нижней до верхней поверхности узла (допуск на размер).

Положение сопрягаемой поверхности узла относительно неподвижной системы отсчета  $O_0x_0y_0z_0$  определяется вектором

$$\begin{aligned} \bar{R}_b = & B_{sd}(\bar{k}_0, h_1 - \Delta h_1) B_{wr}(\bar{i}_1, \Delta \alpha_1) B_{wr}(\bar{j}_1, \Delta \beta_1) B_{sd}(\bar{i}_2, h_3 - \Delta h_3) B_{sd}(\bar{i}_3, h_4 - \Delta h_4) \times \\ & \times B_{sd}(\bar{i}_4, r - \Delta r) B_{sd}(\bar{k}_5, a - \Delta a) B_{sd}(\bar{j}_1, h_2 - \Delta h_2) B_{wr}(\bar{i}_4, \Delta \alpha_4) B_{wr}(\bar{j}_4, \Delta \beta_4) \times \\ & \times B_{wr}(\bar{k}_4, \Delta \gamma_4) r_{b0}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\beta$ ,  $\Delta\gamma$  – соответственно углы перекоса осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  систем отсчета.

Произведение матриц  $B_{wr}(\bar{i}_1, \Delta\alpha_1)B_{wr}(\bar{j}_1, \Delta\beta_1)$  определяет непараллельность плоскости стола относительно горизонтальной плоскости  $O_0X_0Y_0$ .

Матрицы  $B_{sd}(\bar{k}_0, h_1 - \Delta h_1)$ ,  $B_{sd}(\bar{j}_1, h_2 - \Delta h_2)$ ,  $B_{sd}(\bar{i}_2, h_3 - \Delta h_3)$ ,  $B_{sd}(\bar{i}_3, h_4 - \Delta h_4)$ ,  $B_{sd}(\bar{i}_4, r - \Delta r)$  – матрицы перехода от системы  $O_5X_5Y_5Z_5$  к системе  $O_0X_0Y_0Z_0$ ;

Произведение матриц  $B_{wr}(\bar{i}_4, \Delta\alpha_4)B_{wr}(\bar{j}_4, \Delta\beta_4)B_{wr}(\bar{k}_4, \Delta\gamma_4)$  учитывает перпендикулярность оси узла к плоскости стола и его возможный поворот вокруг оси  $z_4$ ;  $B_{sd}(\bar{k}_5, a - \Delta a)$  – матрица сдвига вдоль оси  $z_5$ .

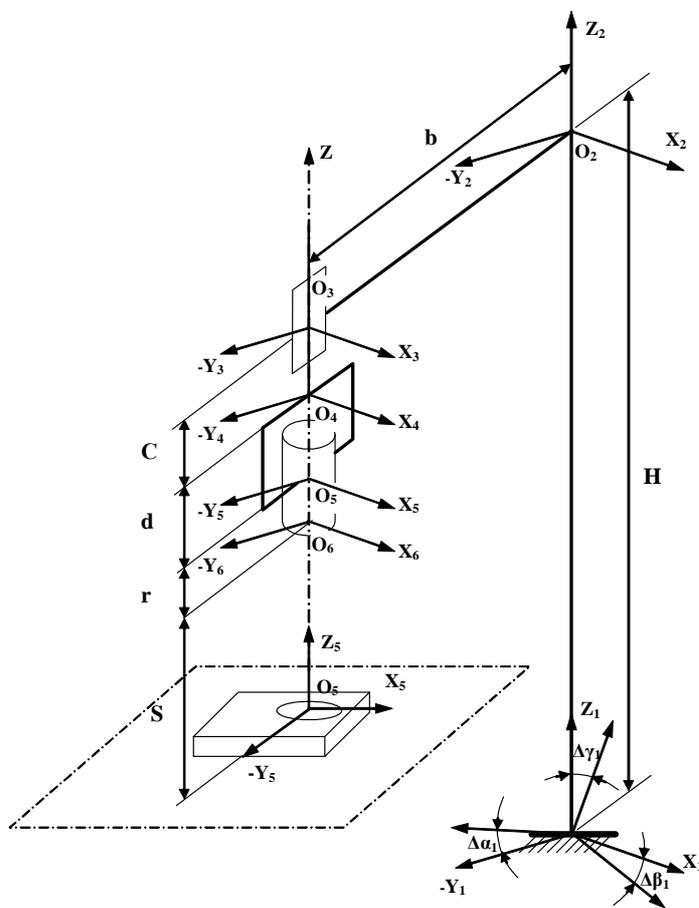


Рис. 4. Исполнительный орган сборочного оборудования

Перемножая матрицы, получим значения координат конца оси сопрягаемой поверхности узла:  $x_b, y_b, z_b$ .

Погрешность смещения сопрягаемой поверхности узла в поворотном подающем устройстве, с учетом неточности изготовления и сборки относительно номинального положения, определится

$$\begin{cases} \Delta x_b = x_b - x_{b0} \\ \Delta y_b = y_b - y_{b0} \\ \Delta z_b = z_b - z_{b0} \end{cases} \quad (4)$$

Рассмотрим вертикально расположенный исполнительный орган сборочного оборудования (рис. 1, 2, 4).

Выберем систему отсчета и параметры исполнительного органа сборочного оборудования:  $O_0X_0Y_0Z_0$  – неподвижная система отсчета;  $O_1X_1Y_1Z_1$  – система отсчета крепления вертикальной

стойки станины к фундаменту;  $O_2X_2Y_2Z_2$  – система отсчета горизонтальной стойки станины;  $O_3X_3Y_3Z_3$  – система отсчета, связанная с направляющей вертикального движения исполнительного органа;  $O_4X_4Y_4Z_4$  – система отсчета

крепления исполнительного сборочного оборудования;  $O_5 X_5 Y_5 Z_5$  – система отсчета, расположенная в креплениях штифтоверта к исполнительному органу;  $O_6 X_6 Y_6 Z_6$  – система отсчета, связанная со шпинделем штифтоверта;  $L$  – расстояние от неподвижной системы отсчета поворотного стола до крепления стойки станины исполнительного органа к фундаменту;  $\psi$  – угол положения крепления стойки станины исполнительного органа к фундаменту;  $H$  – высота вертикальной стойки;  $b$  – длина горизонтальной стойки;  $C$  – расстояние от горизонтальной стойки до крепления исполнительного органа;  $d$  – расстояние от крепления исполнительного органа до крепления штифтоверта;  $r$  – размер, определяющий положение оси шпинделя до плоскости крепления штифтоверта;  $S$  – перемещение исполнительного органа при выполнении операции сборки.

Номинальное положение оси шпинделя устанавливающего устройства относительно неподвижной системы отсчета  $O_0 x_0 y_0 z_0$  определяется вектором

$$\bar{R}_{s_0} = B_{wr}(\bar{k}_0, \psi) B_{sd}(\bar{j}_0, L) B_{sd}(\bar{k}_1, H) B_{sd}(\bar{j}_2, b) B_{sd}(\bar{k}_3, C) B_{sd}(\bar{k}_4, d) B_{sd}(\bar{k}_5, S) r_{s_0}. \quad (5)$$

Координаты номинального положения оси шпинделя устанавливающего устройства

$$\begin{cases} x_{s_0} = (L - b) \cos \psi; \\ y_{s_0} = (L - \hat{a}) \sin \psi; \\ z_{s_0} = H - r - S - d - C. \end{cases} \quad (6)$$

Найдем положение оси шпинделя устанавливающего устройства (рис. 4) в сборочном устройстве с учетом погрешностей изготовления и сборки.

Положение оси шпинделя определяется вектором

$$\begin{aligned} \bar{R}_s = & B_{wr}(\bar{k}_0, \psi + \Delta\psi) B_{sd}(\bar{i}_0, L - \Delta L) B_{sd}(\bar{j}_0, L - \Delta L) B_{sd}(\bar{k}_1, H - \Delta H) \times \\ & \times B_{sd}(\bar{j}_2, b - \Delta b) B_{sd}(\bar{k}_3, C - \Delta C) B_{sd}(\bar{k}_4, d - \Delta d) B_{sd}(\bar{k}_5, S - \Delta S) B_{sd}(\bar{k}_5, r - \Delta r) \times \\ & \times B_{wr}(\bar{i}_1, \Delta\alpha_1) B_{wr}(\bar{j}_1, \Delta\beta_1) B_{wr}(\bar{k}_1, \Delta\gamma_1) B_{wr}(\bar{i}_2, \Delta\alpha_2) B_{wr}(\bar{j}_2, \Delta\beta_2) B_{wr}(\bar{k}_2, \Delta\gamma_2) \times \\ & \times B_{wr}(\bar{i}_3, \Delta\alpha_3) B_{wr}(\bar{j}_3, \Delta\beta_3) B_{wr}(\bar{k}_3, \Delta\gamma_3) B_{wr}(\bar{i}_4, \Delta\alpha_4) B_{wr}(\bar{j}_4, \Delta\beta_4) B_{wr}(\bar{k}_4, \Delta\gamma_4) \times \\ & \times B_{wr}(\bar{i}_5, \Delta\alpha_5) B_{wr}(\bar{j}_5, \Delta\beta_5) \bar{r}_{s_0}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\bar{r}_{s_0}$  – радиус-вектор номинального положения оси шпинделя устанавливающего устройства;  $\Delta\psi, \Delta L, \Delta H, \Delta b, \Delta C, \Delta d, \Delta S, \Delta r$  – допуски на указанные размеры.

Перемножая матрицы, получим значения координат оси, соединяемой детали  $x_s, y_s, z_s$ .

Погрешность смещения оси шпинделя устанавливающего устройства с учетом неточностей изготовления и сборки относительно номинального положения равна

$$\begin{cases} \Delta x_s = x_s - x_{s0} \\ \Delta y_s = y_s - y_{s0} \\ \Delta z_s = z_s - z_{s0} \end{cases} \quad (8)$$

Погрешность смещения осей сопрягаемых поверхностей собираемого узла и шпинделя устанавливающего устройства находится из разности значений выражений (4) и (8):

$$\begin{cases} \delta x = \Delta x_b - \Delta x_s \\ \delta y = \Delta y_b - \Delta y_s \\ \delta z = \Delta z_b - \Delta z_s \end{cases} \quad (9)$$

### Анализ влияния параметров сборочного оборудования на точность совмещения осей

Проведены практические расчеты величины относительного смещения осей в сборочном оборудовании, используя полученные выше зависимости для матричного метода. При расчетах задаются различные величины номинальных значений параметров сборочного оборудования и качества точности их изготовления и сборки для определения влияния этих величин на величину относительного смещения осей соединяемых деталей.

Анализ полученных результатов расчетов показал, что при изготовлении элементов подающего устройства поступательного движения и вертикально расположенного исполнительного органа сборочного оборудования с учетом выбранных номинальных значений параметров и их отклонений даже по шестому качеству точности, автоматизированную сборку соединяемых деталей осуществить невозможно, даже при наличии фасок на сопрягаемых поверхностях, поскольку полученные значения относительного смещения осей значительно превосходят допустимые значения по условиям собираемости [4]. Так, при значениях параметров, указанных в таблице 1 с учетом погрешностей изготовления и сборки по шестому качеству точности, погрешности сборочного устройства составили

$$\begin{cases} \delta x = 4,5 \text{ мм} \\ \delta y = -3,7 \text{ мм} \\ \delta z = 1,74 \text{ мм} \end{cases}$$

При увеличении номинальных значений параметров и качества точности указанные погрешности будут значительно больше. Так при увеличении номинальных значений параметров в 2 раза и изготовлении элементов по 14 качеству точности значения погрешностей составили

$$\begin{cases} \delta x = 10,1 \text{ мм} \\ \delta y = -9,9 \text{ мм} \\ \delta z = 1,1 \text{ мм} \end{cases} \quad (10)$$

Таблиця 1. Номинальные значения параметров сборочного устройства

Устройство												
Подающее						Устанавливаемое						
Параметр												
$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$r$	$a$	$L$	$H$	$b$	$c$	$d$	$r$	$S$
Номинальное значение параметра, мм												
150	421,3	180	104,5	70	80	1000	630	450	130	100	50	120

Следует заметить, что компенсация погрешности по оси  $Z$  в процессе проведения сборочных операций на заданную (необходимую) величину координаты  $Z$  не представляет трудностей. Компенсация может быть выполнена в зависимости от знака погрешности, либо за счет дополнительного перемещения (опускания) устанавливаемого устройства относительно подающего устройства, либо за счет введения в один из элементов сборочного оборудования упругого элемента, например, в патрон, в котором располагается присоединяемая деталь, для обеспечения необходимого перемещения присоединяемой детали относительно базовой. Значительно трудней компенсировать погрешности по осям  $x$  и  $y$ .

### **Выводы**

Таким образом, на основе матричного метода может быть проведен анализ влияния параметров сборочного оборудования на точность совмещения осей соединяемых деталей. С помощью изложенной методики может быть осуществлена проверка условий собираемости узла. Изложенный в статье подход может быть использован не только для устройств сборки, но и для анализа различных пространственных структур производственного оборудования. Предложенный метод определения погрешностей следует рассматривать, как предпосылку к разработке алгоритмических и программных средств автоматизации процесса проектирования устройств сборки.

### **Литература**

1. Симаков А. Л. Метод определения погрешностей устройств для автоматизированной сборки : Вопросы оборонной техники. Сер. 9. Специальные системы управления, следящие приводы и их элементы / А. Л. Симаков. – М.: НТЦ “Информтехника”, 1996. – С. 33-36.
2. Механика промышленных роботов : В 3 кн.: учеб. пособие; под ред. К. В. Фролова, Е. И. Воробьева. – М.: Высш. шк., 1988. – 303 с.
3. Теория механизмов и машин : учеб. для втузов / И. И. Артоболевский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1988. – 638 с.
4. Кузнецова С. В. Методы и средства автоматизированной сборки: представление в фазовом пространстве : монография / А. Л. Симаков, С. В. Кузнецова. – Ковров: ФГБОУ ВПО “КГТА им. В. А. Дегтярева”, 2013. – 176 с.

*Надійшла до редакції  
18 березня 2014 року*

© Кузнецова С. В., Симаков А. Л., Пантелеев Е. Ю., 2014