

УДК 629.7.05

## **Методология поднастройки положений элементов конструкции космического аппарата**

**Бойко С.О.**

*Компания «Информационные спутниковые системы»*

*имени академика М.Ф. Решетнёва»,*

*ул. Ленина, 52, Железногорск, Красноярский край,*

*662972, Россия*

*e-mail: [boyko-s@yandex.ru](mailto:boyko-s@yandex.ru)*

### **Аннотация**

Предложена методология прецизионной подстройки пространственных положений элементов конструкции космического аппарата, которая основана на разработанных: методе и алгоритме измерений по контролю точности перемещения устройства регулировки по шести степеням свободы и методике, включающей в себя способ и программное обеспечение обработки получаемых результатов. Метод измерений положений по каждой контрольной точке основан на предлагаемом алгоритме, что позволяет определять фактическое перемещение с точностью, обеспечиваемой координатно-измерительной машиной. Методика обработки результатов измерений с применением разработанного способа вычисления перемещений позволит обеспечить повышение точности юстировки всего комплекса конструктивных элементов и оценку взаимовлияния отдельных приводов

многостепенного устройства регулировки на точность настройки взаимных положений и геометрических параметров систем космического аппарата в целом.

**Ключевые слова:** космический аппарат, устройство регулировки, контрольная точка, шестистепенной привод.

### **Введение**

При значительном увеличении габаритов элементов конструкции космических аппаратов (КА), что является мировой тенденцией развития космической техники [1], возникают особенности их взаимного расположения, связанные с разнесёнными на некоторые расстояния отдельными массами и соединяющими их конструктивными элементами. Все конструктивные элементы подвергаются влиянию различных факторов космического пространства, в том числе температурным воздействиям, которые приводят к деформациям, ухудшающим оптимальную геометрическую настройку КА.

Следовательно, необходимо обеспечить точную подстройку пространственного положения элементов конструкции КА [2-6]. Для максимально точной подстройки необходимо иметь возможность перемещения по шести степеням свободы устройством регулировки (УР), построенному по схеме типа «гексапод».

Следует отметить, что ввиду наличия погрешностей изготовления ключевых элементов УР (высокоточной линейной передачи, шарниров, корпусных деталей), возникает необходимость его калибровки и контроля точности перемещений. При контроле по одной степени свободы поставленная задача решается с помощью

применения высокоточных средств измерений, которые позволяют проводить контроль линейных и угловых перемещений (например, лазерного интерферометра). Однако, в случае необходимости контроля перемещений по шести степеням свободы одновременно, решение задачи представляется более сложным и требует применения других измерительных систем, а также разработки новых методов измерения, что является актуальным для разработчиков прецизионных устройств позиционирования.

### Методика контроля пространственного перемещения шестистепенного УР

Для контроля точности перемещения верхнего основания УР (рис. 1) по шести степеням свободы необходимо контролировать положение трёх точек, жёстко с ним связанных.

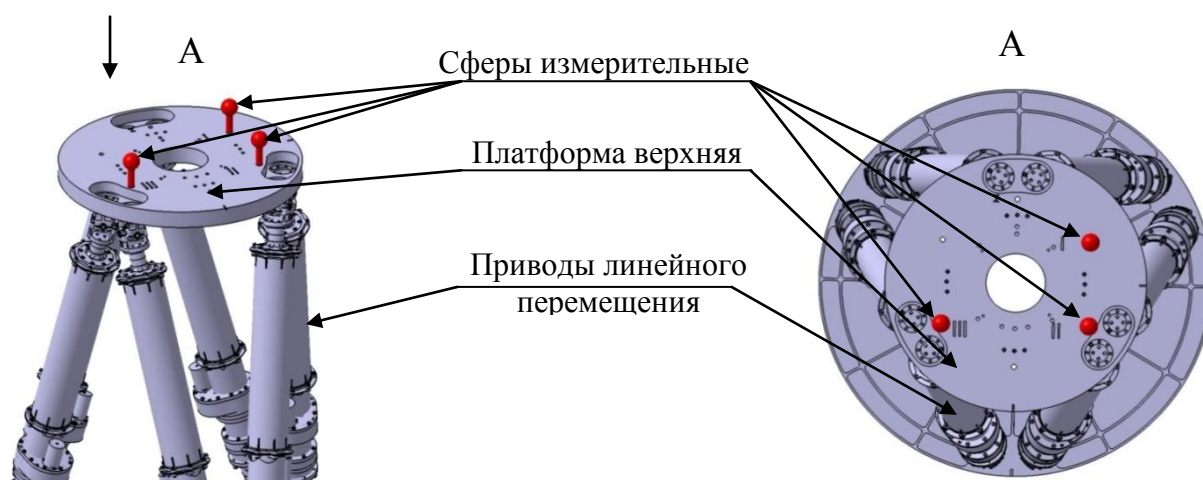


Рис. 1. Схема установки измерительных сфер на верхнее основание УР

В качестве таких точек наиболее удобно иметь измерительные сферы, фиксирующиеся на верхнем основании УР с помощью подставки с резьбой (рис. 2) [7].

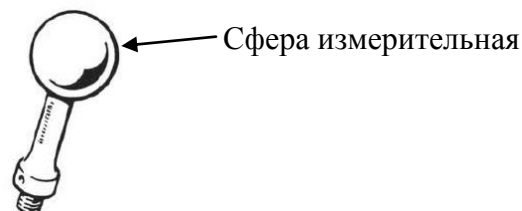


Рис.2. Общий вид измерительной сферы.

Поверхности сфер выполнены с высокой точностью и имеют погрешность исполнения диаметра не более  $\pm 0,001$  мм. С помощью контрольно измерительной машины (КИМ), определяются координаты точки пересечения оси центрального отверстия и посадочной плоскости верхнего основания (рис. 2, 3). Полученные точки принимаются за начало координат, принимаемые за полюс вращения. Прямая, проведённая через центры сфер 1 и 2 определяет направление оси ОУ, а прямая, проведённая через центры сфер 2 и 3 определяет направление оси ОХ. Установка сфер производится на максимально возможном расстоянии друг от друга, что обеспечивает минимальную погрешность при измерении углового перемещения.

Если каждая пара линейных приводов (которые построены на базе планетарной роликвинтовой передачи) будет обрабатывать линейные перемещения с кинематической погрешностью  $\pm 0,003$  мм (что соответствует наивысшей степени точности серийно изготавливаемых в настоящее время линейных передач [8]), то очевидно, что верхняя платформа будет перемещаться в пространстве относительно осей координат с меньшей суммарной погрешностью. Следовательно, в целом, при

работе всех шести приводов, погрешность линейного позиционирования верхней платформы УР составит не более  $\pm 0,003$  мм, а углового – не более  $\pm 0,002^\circ$ .

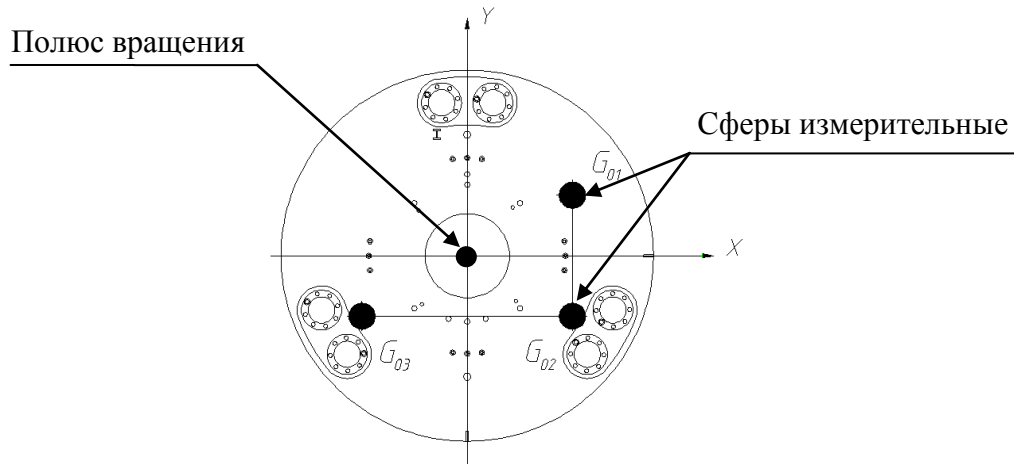


Рис. 3. Схема расположения измерительных сфер на верхнем основании УР

Обмер пространственного положения сфер производился с помощью КИМ (рис. 4) [7].

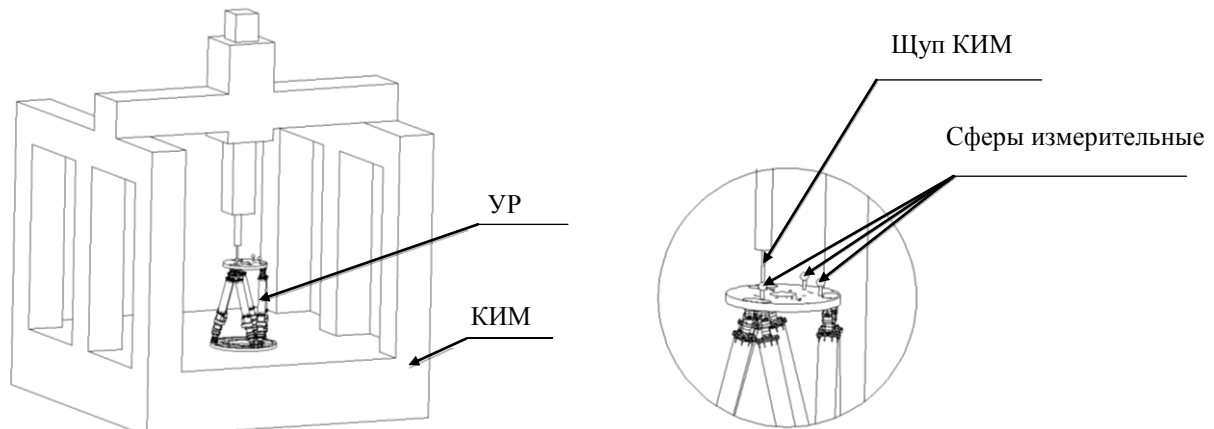


Рисунок 4. Установка УР на КИМ

Касаясь сфер не менее чем в четырёх точках, определяются координаты положения центров каждой из сфер, и результаты вычисляются, с использованием программного обеспечения КИМ [7]. Координаты центров сфер определяют

пространственное положение всего верхнего основания УР. При проведении измерений системы координат КИМ и УР в нулевом положении должны совпадать. Совмещение систем координат происходит в автоматическом режиме, с помощью программного продукта КИМ, с точностью, обеспечиваемой КИМ. Для максимальной точности, обмер каждой сферы производится три или более раз, с определением минимальной погрешности и вычислением координат.

Контроль пространственного положения центров сфер производится в начальном, перед совершением пространственного перемещения, и в конечном положениях. В результате будут получены все 6 пространственных координат трёх точек ( $G_{01}$ ,  $G_{02}$ ,  $G_{03}$ ) с погрешностью, обеспечиваемой КИМ.

### **Методика обработки результатов измерений**

Координаты центров трёх сфер в начальном положении (рис. 5):

$$G_{01}(x_{01}, y_{01}, z_{01});$$

$$G_{02}(x_{02}, y_{02}, z_{02});$$

$$G_{03}(x_{03}, y_{03}, z_{03}).$$

Координаты центров трёх сфер в конечном положении:

$$G_{11}(x_{11}, y_{11}, z_{11});$$

$$G_{12}(x_{12}, y_{12}, z_{12});$$

$$G_{13}(x_{13}, y_{13}, z_{13}).$$

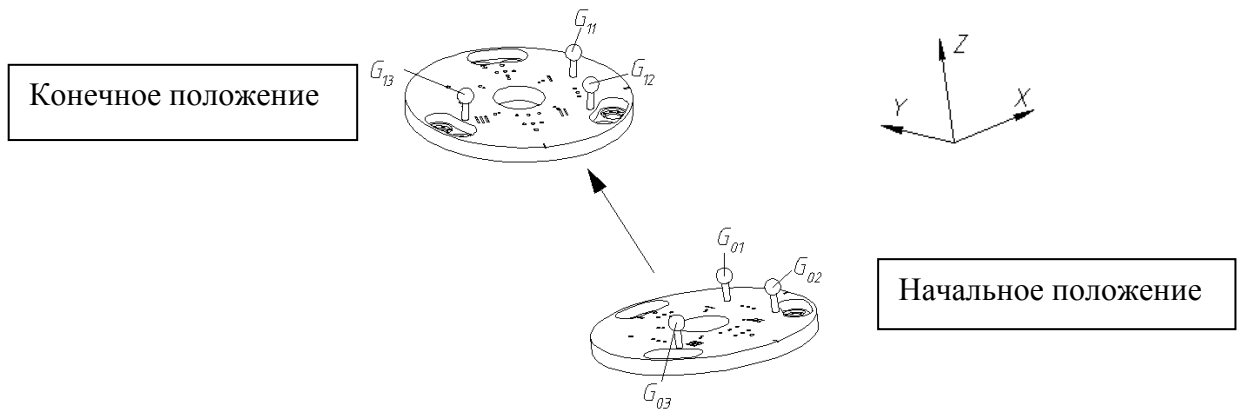


Рис. 5. Верхнее основание УР в начальном и конечном положениях

Способ определения положений состоит в том, чтобы используя полученные координаты определить величины трёх линейных и трёх угловых перемещений сфер. Для определения перемещений необходимо вычислить коэффициенты матрицы преобразования координат при перемещении из начального положения в конечное.

Матричное уравнение имеет вид [10-11]:

$$\mathbf{A} = \mathbf{R} \times \mathbf{B},$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_{01} \\ y_{01} \\ z_{01} \\ 1 \end{bmatrix} - \text{вектор начальных координат центров сфер};$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} x_{11} \\ y_{11} \\ z_{11} \\ 1 \end{bmatrix} - \text{вектор конечных координат центров сфер};$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & x \\ n_y & s_y & a_y & y \\ n_z & s_z & a_z & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \text{матрица преобразования координат.}$$

Из матрицы преобразования координат  $\mathbf{R}$  можно выделить две подматрицы [9-10]:

- матрица угловых перемещений  $\mathbf{M}$  :

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix};$$

- матрица линейных перемещений  $\mathbf{L}$ :

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}.$$

Матрицу угловых перемещений возможно получить из матриц поворотов вокруг трёх ортогональных осей: вокруг оси OX на угол  $\alpha$ , вокруг оси OY на угол  $\varphi$ , вокруг оси OZ на угол  $\theta$ :

- матрица поворота вокруг оси OX на угол  $\alpha$ :

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix};$$

- матрица поворота вокруг оси OY на угол  $\varphi$ :

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix};$$

- матрица поворота вокруг оси OZ на угол  $\theta$ :



$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Вычислим коэффициенты результирующей матрицы угловых перемещений  $\mathbf{T}$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{T} = \mathbf{U} \times \mathbf{V} \times \mathbf{W} &= \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi & -\sin \theta \cos \alpha + \cos \theta \sin \varphi \sin \alpha & \sin \theta \sin \alpha + \cos \theta \sin \varphi \cos \alpha \\ \sin \theta \cos \varphi & \cos \theta \cos \alpha + \sin \theta \sin \varphi \sin \alpha & -\cos \theta \sin \alpha + \sin \theta \sin \varphi \cos \alpha \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \sin \alpha & \cos \varphi \cos \alpha \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Коэффициенты матрицы угловых перемещений равны:

$$n_x = \cos \theta \cos \varphi;$$

$$n_y = \sin \theta \cos \varphi;$$

$$n_z = -\sin \varphi;$$

$$s_x = -\sin \varphi \cos \alpha + \cos \theta \sin \varphi \sin \alpha;$$

$$s_y = \cos \theta \cos \alpha + \sin \theta \sin \varphi \sin \alpha;$$

$$s_z = \cos \varphi \sin \alpha;$$

$$a_x = \sin \theta \sin \alpha + \cos \theta \sin \varphi \cos \alpha;$$

$$a_y = -\cos \theta \sin \alpha + \sin \theta \sin \varphi \cos \alpha;$$

$$a_z = \cos \varphi \cos \alpha.$$

Углы поворота  $\alpha$ ,  $\varphi$ ,  $\theta$  вычисляются по следующим зависимостям:

$$\varphi = -\arcsin(n_z);$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{a_z}{\cos \varphi}\right);$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{n_x}{\cos \varphi}\right).$$

Для поиска коэффициентов  $n_x, n_y, n_z, s_x, s_y, s_z, a_x, a_y, a_z$  необходимо исключить из координат центров сфер линейные перемещения полюса вращения  $x_{ref}, y_{ref}, z_{ref}$ .

Смещения  $x_{ref}, y_{ref}, z_{ref}$  найдём из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} (x_{11} - x_{ref})^2 + (y_{11} - y_{ref})^2 + (z_{11} - z_{ref})^2 = l_1^2 \\ (x_{12} - x_{ref})^2 + (y_{12} - y_{ref})^2 + (z_{12} - z_{ref})^2 = l_2^2, \\ (x_{13} - x_{ref})^2 + (y_{13} - y_{ref})^2 + (z_{13} - z_{ref})^2 = l_3^2 \end{cases}$$

где  $l_1, l_2, l_3$  - расстояние от центра сфер 1, 2, 3 соответственно до полюса вращения и вычисляются из следующих зависимостей:

$$\begin{aligned} l_1 &= \sqrt{x_{01}^2 + y_{01}^2 + z_{01}^2}; \\ l_2 &= \sqrt{x_{02}^2 + y_{02}^2 + z_{02}^2}; \\ l_3 &= \sqrt{x_{03}^2 + y_{03}^2 + z_{03}^2}. \end{aligned}$$

Коэффициенты матрицы преобразования вычисляются из системы 9 уравнений:

$$\begin{bmatrix} x_{01} \\ y_{01} \\ z_{01} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{11} - x_{ref} \\ y_{11} - y_{ref} \\ z_{11} - z_{ref} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} x_{02} \\ y_{02} \\ z_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{12} - x_{ref} \\ y_{12} - y_{ref} \\ z_{12} - z_{ref} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} x_{03} \\ y_{03} \\ z_{03} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{13} - x_{ref} \\ y_{13} - y_{ref} \\ z_{13} - z_{ref} \end{bmatrix},$$

где  $x_{ref}, y_{ref}, z_{ref}$  - смещение полюса вращения относительно начала координат.

Из системы 9 линейных уравнений имеем:

$$\begin{cases} x_{01} = (x_{11} - x_{ref})n_x + (y_{11} - y_{ref})s_x + (z_{11} - z_{ref})a_x \\ x_{02} = (x_{12} - x_{ref})n_x + (y_{12} - y_{ref})s_x + (z_{12} - z_{ref})a_x \\ x_{03} = (x_{13} - x_{ref})n_x + (y_{13} - y_{ref})s_x + (z_{13} - z_{ref})a_x \end{cases}$$

Преобразуем полученные уравнения в матричный вид:

$$\begin{bmatrix} x_{01} \\ x_{02} \\ x_{03} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} - x_{ref} & y_{11} - y_{ref} & z_{11} - z_{ref} \\ x_{12} - x_{ref} & y_{12} - y_{ref} & z_{12} - z_{ref} \\ x_{13} - x_{ref} & y_{13} - y_{ref} & z_{13} - z_{ref} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_x \\ s_x \\ a_x \end{bmatrix}.$$

Найдём коэффициенты  $n_x, s_x, a_x$ :

$$\begin{bmatrix} n_x \\ s_x \\ a_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{01} \\ x_{02} \\ x_{03} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{11} - x_{ref} & y_{11} - y_{ref} & z_{11} - z_{ref} \\ x_{12} - x_{ref} & y_{12} - y_{ref} & z_{12} - z_{ref} \\ x_{13} - x_{ref} & y_{13} - y_{ref} & z_{13} - z_{ref} \end{bmatrix}^{-1}.$$

Аналогичным образом найдём коэффициенты  $n_y, s_y, a_y$  и  $n_z, s_z, a_z$ :

$$\begin{bmatrix} n_y \\ s_y \\ a_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{01} \\ y_{02} \\ y_{03} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{11} - x_{ref} & y_{11} - y_{ref} & z_{11} - z_{ref} \\ x_{12} - x_{ref} & y_{12} - y_{ref} & z_{12} - z_{ref} \\ x_{13} - x_{ref} & y_{13} - y_{ref} & z_{13} - z_{ref} \end{bmatrix}^{-1};$$

$$\begin{bmatrix} n_z \\ s_z \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{01} \\ z_{02} \\ z_{03} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{11} - x_{ref} & y_{11} - y_{ref} & z_{11} - z_{ref} \\ x_{12} - x_{ref} & y_{12} - y_{ref} & z_{12} - z_{ref} \\ x_{13} - x_{ref} & y_{13} - y_{ref} & z_{13} - z_{ref} \end{bmatrix}^{-1}.$$

Определив коэффициенты  $n_x, n_y, n_z, s_x, s_y, s_z, a_x, a_y, a_z$ , определим углы  $\alpha, \varphi, \theta$ :

$$\varphi = -\arcsin(n_z);$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{a_z}{\cos \varphi}\right);$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{n_x}{\cos \varphi}\right).$$

Зная коэффициенты  $n_x, n_y, n_z, s_x, s_y, s_z, a_x, a_y, a_z$ , вычисляются перемещения  $x, y, z$ :

$$x = x_{01} - n_x x_{11} - s_x y_{11} - a_x z_{11};$$

$$y = y_{01} - n_y x_{11} - s_y y_{11} - a_y z_{11};$$

$$z = z_{01} - n_z x_{11} - s_z y_{11} - a_z z_{11}.$$

В качестве примера представлен расчёт перемещения верхнего основания УР при последовательном перемещении вокруг оси ОХ на угол  $\alpha = 1,403^\circ$ , вокруг оси ОУ на угол  $\varphi = -1,329^\circ$ , вокруг оси ОZ на угол  $\theta = 1,580^\circ$  и вдоль оси ОХ на величину  $x = 3,654$  мм, по оси ОУ  $y = 3,216$  мм и оси ОZ  $z = -1,462$  мм.

После обмера на КИМ получены координаты центров трёх сфер в начальном положении:

$$G_{01} (-99,593; -57,5; 40); G_{02} (-99,593; 57,5; 40); G_{03} (99,593; 57,5; 40)$$

и координаты этих сфер в конечном положении:

$$G_{11} (-100,545 - 62,44; 45,36); G_{12} (-103,708; 52,484; 42,607); G_{13} (95,349; 57,848; 37,847).$$

В результате расчёта по предложенной методике получены следующие значения угловых перемещений:

$$\varphi = -\arcsin(0,023237) = -1,331^\circ;$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{0,999431}{\cos(-1,331^\circ)}\right) = 1,401^\circ;$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{0,999351}{\cos(-1,331^\circ)}\right) = 1,578^\circ,$$

и линейных перемещений:

$$x = -99,593 - 0,999351 \cdot (-100,545) - 0,026932 \cdot (-62,44) - (-0,023901) \cdot 45,36 = 3,653 \text{ мм};$$

$$y = -57,5 - (-0,027501) \cdot (-100,545) - 0,999331 \cdot (-62,44) - (-0,023932) \cdot 45,36 = 3,219 \text{ мм};$$

$$z = 40 - 0,023237 \cdot (-100,545) - 0,024581 \cdot (-62,44) - 0,999431 \cdot 45,36 = -1,463 \text{ мм}.$$

Анализ теоретического и экспериментального значений пространственных перемещений УР показал (табл. 1), что теоретическое перемещение соответствует экспериментальному с погрешностью  $\pm 0,003$  мм в линейном выражении и  $\pm 0,002^\circ$  в угловом выражении.

*Таблица 1*

### Сравнение теоретического и расчётного перемещений УР

Составляющая перемещения	Теоретическое перемещение	Экспериментальное перемещение
Вращение вокруг оси OX на угол $\alpha$ , °	1,403 $\pm$ 0,002	1,401
Вращение вокруг оси OY на угол $\varphi$ , °	-1,329 $\pm$ 0,002	-1,331
Вращение вокруг оси OZ на угол $\theta$ , °	1,580 $\pm$ 0,002	1,578
Перемещение вдоль оси OX, мм	3,654 $\pm$ 0,003	3,653
Перемещение вдоль оси OY, мм	3,216 $\pm$ 0,003	3,219
Перемещение вдоль оси OZ, мм	-1,462 $\pm$ 0,003	-1,463

Указанные погрешности приводят к взаимному смещению конструктивных элементов КА в зоне, величина которой зависит от их удаления друг от друга. В качестве примера, произведён расчёт зоны при разнесении настраиваемых элементов КА на расстояние 20 м. Размеры зоны укладываются в параллелепипед с основанием  $1,4 \times 1,4$  мм и высотой 0,006 мм, что, в большинстве случаев, находится в пределах допусковых значений.

Для проведения вычислений разработаны математический аппарат, алгоритм и создана программа для ЭВМ в пакете Maple 11 [11].

### Заключение

Предложенная методология, основанная на разработанных методах контроля, способах измерений и средствах, включающих контрольно-измерительную машину, измерительные сферы, а также созданное программное обеспечение и алгоритм обработки результатов измерений обеспечивают автоматизацию процесса точностных испытаний УР и могут использоваться при контроле точности многостепенных прецизионных УР. В зарубежных компаниях, выпускающих высокоточные механизмы типа «гексапод» (например, Physik Instrumente, Германия), контроль точности перемещения верхнего основания производится с помощью лазерного интерферометра отдельно по каждой степени свободы [12], остальные же пять возникающих при этом погрешностей не контролируются, хотя это может оказаться критичным для некоторых областей применения. Предложенный в статье способ контроля позволит получить шесть значений погрешностей при совершении любого пространственного перемещения верхнего основания УР в пределах рабочей зоны. Предложенная методология заключительной юстировки всего комплекса конструктивных элементов и механических устройств позволяет учитывать взаимовлияние отдельных приводов в УР, изменение геометрии конструктивных элементов КА для достижения заданных параметров в процессе наземной экспериментальной отработки и при эксплуатации всего комплекса КА на орбите.

#### **Библиографический список**

1. Мельников В.М., Матюшенко И.Н., Чернова Н.А., Харлов Б.Н. Проблемы создания в космосе крупногабаритных конструкций // Труды МАИ. 2014. № 78.  
URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=53742>
2. Santiago-Prowald J. Large deployable antennas mechanical concepts // Proceedings of large space apertures workshop. Pasadena, November 10 – 11, 2008, URL: <http://www.kiss.caltech.edu/workshops/apertures2008/talks/santiagoprowald.pdf>
3. Asadurian R. Pugh, J. Hammond A.A. Strain-free lock and release mechanism for an elastically suspended two-axis gimbal // Proceedings of 37<sup>th</sup> Aerospace Mechanisms Symposium, Galveston, May 19 – 21, 2004, pp. 97 – 106.
4. Gossant A., Morichon F. Qualification of a High Accuracy Dual-Axis Antenna Deployment and Trimming Mechanism // Proceedings of the 40th Aerospace Mechanisms Symposium, NASA Kennedy Space Center, May 12-14, 2010.
5. Henein S. Spanoudakis P., Schwab P. Design and Development of the Point Ahead Angle Mechanism for the Laser Interferometer Space Antenna // Proceedings of the 13th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, ESMATS - 2009, Vienna, Austria, September 23-25, 2009.
6. Brossier J., Jeandot X., Baudasse Y., Grima D., Champanard F. Development of a High Resolution Rotary Actuator for an Antenna Trimming Mechanism // Proceedings of the 39th Aerospace Mechanisms Symposium, NASA Marshall Space Flight Center, May 7-9, 2008.
7. Бойко С.О. Методика проверки параметров шестистепенного механизма юстировки рефлектора космического аппарата // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. 2013. №4. С. 104-107.

8. Roller Screws. Каталог: разработчик и изготовитель «SKF Group», Франция, 2008.  
URL: [www.skf.com/binary/82-153959/14489-EN---Roller-screw-catalogue.pdf](http://www.skf.com/binary/82-153959/14489-EN---Roller-screw-catalogue.pdf)
9. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 560 с.
10. Макаров И.М., Пантюшин С.В., Назаретов В.М., Тягунов О.А. и др. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. - М.: Высшая школа, 1986.- Кн. 5.- 175 с.
11. Бойко С.О., Смирнов Н.А. Программа для оценки фактического перемещения «гексапода» одновременно по шести степеням свободы // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014612666, 04.03.2014.
12. Hexapod 6-Axis Positioning Systems M-824, M-840, M-850: User Manual: Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG. Germany, 2008, 107 p.