УДК 621.01

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА

# Э.Е. Сильвестров, В.В. Кореновский

Дано решение задачи по осуществлению поворота зеркальной системы космического телескопа при помощи устройства параллельной структуры. В качестве такого устройства использован наиболее простой плоский шестизвенный механизм с тремя степенями свободы.

Ключевые слова: космический телескоп, механизм параллельной структуры.

## Введение

Ориентация космического телескопа может быть осуществлена посредством механизмов параллельной структуры [1–5]. Для поворота космического телескопа структурная схема устройства параллельной структуры должна представлять собой плоский механизм с тремя степенями свободы [5]. Его выходное звено, жестко связанное с телескопом, совершает движение в вертикальной плоскости. При этом концевой шарнир выходного звена изменяет свои координаты в плоскости при фиксированном положении другого концевого шарнира. Наиболее простой механизм этого типа – плоский шестизвенный механизм с тремя степенями свободы.

#### Первый этап синтеза механизма

Синтез шестизвенных механизмов с тремя степенями свободы проводится в несколько этапов, первым из которых является структурный синтез. В работе [5] выполнен структурный синтез таких механизмов с одноподвижными вращательными парами, применяемыми, как правило, в космических системах. В результате установлено, что только две структурные схемы пригодны для синтеза шестизвенного механизма с тремя степенями свободы. Для дальнейшего исследования была выбрана схема механизма, представленная на рис. 1, поскольку для такой схемы двигатели ведущих звеньев легко установить на основание. Из рисунка 1 видно, что к ведущему звену 1 и двойному маятнику с ведущими звеньями 5 и 4 присоединена структурная группа Ассура II класса 1-го вида со звеньями 2 и 3. Точки О и Е являются шарнирами стоек для рассматриваемого двухопорного механизма.





9

Обозначим через  $l_i$  (i = 1, 2, ..., 6) длину *i*-го звена механизма. Выходное звено 3 представляет собой фокальный криоконтейнер в виде прямоугольника, имеющего основание *BC* и высоту  $A_1$ , а также зеркала телескопа радиусом *R*. На этом же рисунке показан размер  $A_3$ , характеризующий горизонтальное положение звена 3, который назначают из конструктивных соображений. Для определения координат центров шарниров механизма используется система координат *XOY* с началом в центре шарнира *O* на левой опоре (см. рис. 1).

#### Второй этап синтеза механизма

После выбора структурной схемы следует второй этап синтеза шестизвенного механизма с тремя степенями свободы [6–8], связанный с определением по заданным условиям размеров звеньев рассматриваемого механизма (см. рис. 1). Последний предназначен для поворота звена *3* из его крайнего верхнего (горизонтального) положения в крайнее нижнее (вертикальное). Данная постановка задачи отличается от рассмотренной в работе [5] тем, что длины звеньев механизма находятся не по двум, а по трем заданным условиям.

Итак, с учетом основного назначения рассматриваемый механизм должен удовлетворять следующим *трем условиям*.

1. Для осуществления свободного поворота зеркала телескопа в крайнем, вертикальном, положении звена 3 в механизме должен быть предусмотрен некоторый зазор  $\Delta$ . Этот зазор заключается между опорной линией *OE* и точкой *M*, соответствующей наибольшему расстоянию зеркала телескопа от середины звена 3, равному радиусу зеркала телескопа (см. рис. 1). То есть траектория точки *M* не должна пересекаться с опорной линией *OE*.

2. Движение звеньев рассматриваемого механизма должно происходить выше опорной линии *OE*, т. е. координаты центров шарниров *A* и *D* должны быть только положительными  $(y_A > 0, y_D > 0)$ .

3. Рассматриваемый механизм при условии складывания в транспортное положение и встраиваемости в принятую конструкцию космического аппарата должен иметь минимальные габариты. Здесь идет речь о допустимом размере в поперечном направлении, т. е. по оси *X*. Этот размер, как правило, не должен превышать заданную величину межосевого расстояния  $l_{OE}$ , равного длине  $l_6$  звена 6 (см. рис. 1). При этом для осуществления возможности складывания механизма в транспортное положение искомые длины звеньев  $l_i$  (i = 1, 2, 4, 5) целесообразно выбирать примерно равными друг другу, но меньшими длины звена  $l_6$ .

Третье условие является весьма важным. Его выполнение требует существенного изменения алгоритма решения поставленной задачи по нахождению неизвестных длин звеньев механизма в сравнении с работой [5].

Таким образом, целью настоящего исследования является уточнение полученных в работе [5] результатов с учетом требований складываемости в транспортное положение рассматриваемого механизма и встраиваемости его в конструкцию космического аппарата.

Исходя из конструктивных соображений заданное положение механизма определяется следующими величинами: координатами центров шарниров *B* и *C*, для которых  $y_C = y_B = A_3$ ; длиной выходного звена *3* и межосевым расстоянием, или длиной  $l_6$ , причем  $l_3 = l_6$ ; максимальным углом поворота звена *3*, равным 90°, и ранее приведенными параметрами  $A_1$  и *R*.

Синтез рассматриваемой схемы заключается в том, чтобы по заданному положению механизма с координатами  $y_{c} = y_{B} = A_{3}$  построить некое рабочее положение при других значениях  $y_c = y_B$  для начала поворота звена 3, которое будет удовлетворять указанным выше трем условиям. Из этого рабочего положения рассматриваемый механизм будет осуществлять поворот выходного звена 3 на необходимый угол, предельное значение которого равно 90°. Как для заданного, так и для рабочего положений механизма в начале и конце поворота звена 3, с учетом требования складываемости в транспортное положение, необходимо определить длины звеньев  $l_1, l_2, l_4, l_5$  и углы их поворота  $\phi_i$  (*i* = 1, 2, 4, 5). С этой целью структурная цепь механизма разбивается на две части: первая – цепь ЕДСЕ, представляющая собой механизм двойного маятника, и вторая - цепь ОАВСО, которая является двухкоромысловым механизмом.

Рассмотрим рабочее положение механизма в тот момент, когда произведен поворот звена *3* на максимальный угол 90°. Тогда для выполнения первого условия координата центра шарнира *С* механизма двойного маятника будет определяться из следующего соотношения:

10

$$y_c = l_3 / 2 + R + \Delta, \tag{1}$$

где величину  $\Delta$  обычно выбирают в пределах 0,02...0,05 м.

По найденному из соотношения (1) значению  $y_c$  и при учете третьего условия для транспортного положения необходимо в механизме двойного маятника определить длины звеньев  $l_4$  и  $l_5$ . Для всего рассматриваемого устройства (см. рис. 1) последнее условие предполагает, что при переходе из транспортного положения в заданное, а затем из заданного в рабочее, в котором при фиксировании точки *C* осуществляется поворот телескопа, абциссы шарниров всех звеньев находятся в пределах допустимого размера.

Ранее в работе [5] при проектировании рассматриваемого механизма по двум условиям было обращено внимание на то, что центр шарнира C для его рабочего положения определялся только величиной  $y_c$ , и не имелось никаких ограничений по оси x. Теперь же при синтезе механизма по трем условиям центр шарнира Cв том же рабочем положении должен определяться не только величиной  $y_c$ , но и величиной  $x_c$ . Так как по конструктивным соображениям принято равенство  $l_3 = l_6$ , то только при  $x_c = x_E$ длина выходного звена  $l_3$  в начальном (горизонтальном) рабочем положении не будет увеличивать допустимый размер по оси x.

В механизме двойного маятника точка C с координатами  $y_C$  (определяется из соотношения (1)) и  $x_C = x_E$  принимается за неподвижную. При этом абсциссы центров шарниров D и C удовлетворяют третьему условию, если точка D перемещается по восходящей ветви ее траектории движения, находящейся в пределах от 180° до 90° по углу поворота  $\varphi_5$  ведущего звена 5. При длине звена  $l_4$  точка C будет совершать движение по некоторой траектории с  $x_C \leq x_E$  за счет соответствующего изменения значения угла поворота  $\varphi_4$  ведущего звена 4.

Следует отметить, что при выборе длин звеньев  $l_4$  и  $l_5$  могут возникнуть две ситуации. Первая имеет место при  $y_C < 2l_6$ . Тогда для удовлетворения третьего условия в транспортном положении механизма целесообразно принять, что

$$\ell_5 = y_C / 2; \ l_4 = l_5 + \Delta_4,$$
 (2)

где величину  $\Delta_4$  обычно выбирают в пределах 0...0,05 м.

При  $\Delta_4 > 0$  пересечение окружностей радиусов  $l_4$  и  $l_5$ , вычисленных по соотношению (2), происходит в двух точках, и из них выбирается та, которая находится на восходящей ветви траектории движения точки D. Если принять  $\Delta_4 = 0$ , то указанные окружности будут иметь точку касания, принадлежащую восходящей ветви траектории движения точки D, т. е. при  $\varphi_5 = 90^\circ$  ведущего звена 5.

Вторая ситуация возникает, если  $y_C > 2l_6$ . В этом случае, используя соотношения (2) для определения длин звеньев  $l_4$  и  $l_5$ , находят, что в транспортном положении механизма получаемый размер по оси *x* больше допускаемого при начальном угле поворота  $\varphi_{5H} = 180^\circ$  звена 5 и равен  $l_1 + l_5 - l_6$ . Чтобы рассматриваемый механизм в транспортном положении вписался в заданный поперечный размер длины  $l_6$  в диаметре, необходимо установить угол  $\varphi_{5H}$ , равный

$$\varphi_{5H} = 180^\circ - \arccos \frac{l_6}{l_5}.$$

Перейдем к анализу работы двухкоромыслового механизма с двумя опорными точками O и C. В начальном рабочем положении коромысло 3 располагается горизонтально, и точка B имеет координаты  $y_B = y_C$ ;  $x_B = x_0$ . В этом механизме необходимо определить длины звеньев  $l_1$  и  $l_2$ , а также значения углов поворота  $l_5$  и  $\phi_{1k}$  ведущего звена I в начальном и конечном рабочем положениях, соответствующих горизонтальному и вертикальному расположениям выходного звена 3.

При выполнении поворота телескопа точка В движется по дуге окружности радиуса  $CB = l_3$  с неподвижным центром в точке C, причем точка В перемещается по ее нисходящей ветви траектории движения, соответствующей изменению угла поворота звена 3 от 180° до 270°. В то же время точка А движется по дуге окружности радиуса  $OA = l_1$  с центром в точке О также по ее нисходящей ветви траектории движения, находящейся в пределах 90°...0° по углу поворота ведущего звена 1. Это представление о месте расположения точки А на ее траектории движения необходимо учесть как при определении длин звеньев  $l_1$  и  $l_2$ , так и при нахождении передаточной функции механизма, которая однозначно выражает зависимость угла поворота выходного звена 3 от угла поворота ведущего звена 1.

Далее при определении неизвестных значений длин звеньев  $l_1$  и  $l_2$  в двухкоромысловом механизме поступают так же, как при выборе длин звеньев  $l_5$  и  $l_4$ . Поскольку в начальном раЭ.Е. Сильвестров, В.В. Кореновский

бочем положении  $y_B = y_C$ , то для удовлетворения третьего условия, связанного с транспортным положением механизма, при нахождении величин  $l_1$  и  $l_2$  используют соотношения, аналогичные выражениям (2):

$$l_1 = y_B / 2; \quad l_2 = l_1 + \Delta_2,$$
 (3)

где  $\Delta_2 = \Delta_4$ .

Из соотношений (2) и (3) следует, что  $l_1 = l_5$  <br/>и $l_2 = l_4$ .

Итак, определив длины звеньев  $l_1$  и  $l_2$  и осуществив пересечение окружностей радиусов  $OA = l_1$  и  $BA = l_2$  в крайних положениях звена 3 двухкоромыслового механизма, получают на нисходящей ветви траектории движения точки A соответствующие положения ведущего звена 1 и углы его поворота  $\phi_{1\mu}$  и  $\phi_{1\nu}$ .

На рисунке 2 построены планы рассматриваемого шестизвенного механизма с тремя степенями свободы для заданного положения механизма *OA'B'C'D'EO* и для его начального *OABCDEO* и конечного *OA*<sub>к</sub>*B*<sub>к</sub>*CDEO* рабочих положений при повороте выходного звена 3 на требуемый угол 90° при следующих значениях заданных величин: R = 5 м;  $y_{C'} = y_{B'} = A_3 = 3,7$  м;  $l_3 = l_6 = 3$  м;  $A_1 = 1$  м.

На основании выполненного проектирования плоского шестизвенного механизма с тремя степенями свободы были получены следующие значения неизвестных величин:  $l_1 = l_5 = 3,275$  м;  $l_2 = l_4 = 3,325$  м;  $y_C = 6,55$  м;  $\varphi_{1_{\rm H}} = 83^\circ$ ;  $\varphi_{1_{\rm H}} = 4,5^\circ$ ;  $\varphi_4 = 83^\circ$ ;  $\varphi_5 = 97^\circ$ . Следует заметить, что при условии  $y_C > 2l_6$  синтезиро-



Рис. 2. Промежуточные положения шестизвенного механизма с тремя степенями свободы

ванный механизм будет иметь допустимый габаритный размер по оси *x*, равный 3,55 м.

## Заключение

В работе предложен метод проектирования плоского шестизвенного механизма с тремя степенями свободы для ориентации космического телескопа. При этом были заданы требования отсутствия пересечения траекторий движения всех шарниров устройства и точки *M* с опорной линией *OE* (см. рис. 1), а также его складываемости в транспортное положение и встраиваемости в конструкцию космического аппарата. Выполнение последнего требования оценивалось допустимым размером полученного механизма в поперечном направлении.

Предлагаемый метод синтеза таких устройств предполагает разложение их на два более простых механизма: двойного маятника и двух-коромыслового. Первый механизм с двумя степенями свободы сохраняет постоянное положение шарнира C, второй осуществляет поворот выходного звена на требуемый угол 90° вокруг неподвижного шарнира C.

При проектировании рассматриваемого механизма были определены все неизвестные размеры звеньев и углы их поворота, а также допустимый поперечный размер. Кроме того, найдена зависимость угла поворота выходного звена от угла поворота ведущего звена двухкоромыслового механизма. Из сравнения результатов, полученных в работе [5] и в настоящем исследовании, можно сделать вывод, что учет третьего условия о минимальности габаритов механизма приводит к существенному изменению длин звеньев  $l_4$  и  $l_5$ .

### Список литературы

- 1. *Merlet J.P.* Parallel Robots. Kluwer Academic Publishers, 2000. 372 p.
- Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. – М.: Наука, 1991. – 96 с.
- Крайнев А.Ф., Ковалев Л.К., Васецкий Б.Г., Глазунов В.А. Разработка установок для лазерной резки на основе механизмов параллельной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1994. № 1. С. 84–93.
- 4. Глазунов В.А., Муницына Н.В. Оптимальное проектирование манипуляторов параллельной структуры для агрессивных сред

12

текстильного производства // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 1994. № 5. С. 85–89.

- 5. Артеменко Ю.Н., Сильвестров Э.Е., Кореновский В.В., Глазунов В.А. Синтез механизмов параллельной структуры для ориентации антенны космического телескопа // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. № 4. С. 3–9.
- 6. Левитский Н.И. Теория механизмов и

машин. – М.: Наука, 1979. – 576 с.

- Добровольский В.В. Теория механизмов с двумя и более степенями свободы // Тр. Станкоинструментального института. Т. 4. 1939. С. 41–76.
- Теория механизмов и машин. Проектирование / Под ред. О.И. Кульбачного. М.: Высшая школа, 1970. – 288 с.

Материал поступил в редакцию 03.06.13.

## СИЛЬВЕСТРОВ Эдуард Евгеньевич

E-mail: elena-silv@mail.ru Тел.: (916) 268-52-10 (моб.) Кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Теория механизмов и структура машин» Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Сфера научных интересов – прикладная теория упругих колебаний, шагающие устройства и рулевые механизмы, механизмы параллельной структуры. Автор 80 публикаций, двух изобретений.

# КОРЕНОВСКИЙ

Владимир Викторович E-mail: vkorenovskii@mail.ru Тел.: (915) 894-27-78 (моб.) Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория механизмов и машин» Московского государственного машиностроительного университета МА-МИ. Сфера научных интересов – синтез механизмов, движителей шагающих устройств и рулевых механизмов для автомобилей и шагающих устройств, синтез механизмов параллельной структуры. Автор более 50 публикаций и пяти изобретений.