

3. Патент № 96360 РФ, МПК В64G1/00. Пружинный механизм для раскрытия подвижных узлов космического аппарата, 2010 г.
4. Янгулов В. С. Зубчатые передачи повышенной точности и долговечности. Под ред. В. С. Дмитриева. — Томск: Изд-во ТПУ, 2008. — 137 с.

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЙ КИНЕМАТИКИ  
РАСКРЫТИЯ КРЫЛЬЕВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Яковлев А.С.

Научный руководитель: Малышенко А.М., профессор, д.т.н.  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050  
E-mail: alexyakovlev90@gmail.com

**COMPUTER-AIDED DERIVATION OF KINEMATIC EQUATIONS  
OF DEPLOYABLE SOLAR PANELS OF SPACECRAFTS**

Yakovlev A.S.

Scientific Supervisor: Prof., Dr. Malysenko A.M.  
Tomsk Polytechnic University  
Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050  
E-mail: alexyakovlev90@gmail.com

*Предложен алгоритм автоматизированного формирования уравнений кинематики крыльев солнечных батарей, в основе которого лежит разработанный метод формализованного описания кинематики механизмов. Работа алгоритма продемонстрирована на примере формирования уравнений кинематики механизма раскрытия солнечной батареи с помощью разработанного программного средства.*

*The paper proposes and provides a brief description of the algorithm for deriving kinematics equations for deployable solar panels, based on designed method of formalised description of mechanisms kinematics. The practical usage of the algorithm is demonstrated by deriving kinematics equations for solar panel deployment with using developed software.*

**ВВЕДЕНИЕ**

Разработка космических аппаратов (КА) представляет собой сложный и многоэтапный процесс. Неотъемлемой частью каждого КА является система энергоснабжения, которая, в свою очередь, для подавляющего большинства КА в качестве источника электроэнергии использует солнечные батареи (БС). Доставка любого груза в космическое пространство предполагает решение некоторых проблем, связанных со снижением массогабаритных характеристик элементов и узлов КА. С этой целью крылья солнечных батарей (КБС) снабжают механизмом раскрытия.

Индивидуальный подход к проектированию и производству КА влечет за собой множество различных исполнений бортовых элементов КА в зависимости от требований технического задания, в том числе механизмов раскрытия КБС. Прежде чем снабдить КА крыльями БС необходимо пройти стадии моделирования и испытания КБС. Одним из важнейших этапов моделирования любой механической системы, осуществляющей сложные движения, является построение ее кинематической модели. Результаты моделирования КБС в дальнейшем используются в разработке средств для их испытания, так называемых систем обезвешивания КБС [1, 2], а в дальнейшем – для построения самих механизмов раскрытия.

В данной работе, с целью автоматизированного формирования кинематических моделей механизмов раскрытия КБС, разработано программное средство и использован способ формализованного описания манипуляционных роботов, предложенный в [3]. Данный метод к настоящему моменту успешно

применяется для получения уравнений кинематики различных манипуляционных механизмов [4]. Формализованное описание представляет собой компактный и содержательный массив исходных данных для разработанного программного средства [5]. Принцип работы программы будет описан далее. Результат работы программного средства на основе представленного метода формализованного описания будет продемонстрирован на конкретном примере – составлении уравнений кинематики для существующей модели КБС, которое по конструктивному исполнению соответствует используемой на КА «Экспресс», производимых производства АО «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнёва», г. Железногорск [6].

### 1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ УРАВНЕНИЙ КБС

С целью формирования исходных данных для автоматизации процесса получения уравнений кинематики КБС КА в данной работе использован метод формализованного описания кинематических цепей манипуляторов [3]. Несмотря на то, что в своей изначальной формулировке метод применялся исключительно для решения задач кинематики манипуляционных роботов, в настоящее время он может быть легко адаптирован к решению аналогичных задач для многих других механизмов. Подробно с данным методом можно ознакомиться также в [4]. Кратко, данный метод предполагает описание каждого элемента кинематической цепи механизма в формате  $I(m; \mathbf{n}; \mathbf{p})$ , где  $I$  – идентификатор описываемого элемента;  $m$  – собственный номер данного элемента, присвоенный в процессе описания цепи;  $\mathbf{n} = [n_1; n_2; \dots; n_\nu]$  – вектор собственных номеров элементов цепи, с которыми непосредственно связан элемент  $m$ ;  $\mathbf{p} = [p_1; p_2; \dots; p_\mu]$  – вектор конструктивных параметров элемента  $m$ . Последовательность записи всех указанных параметров в описании  $I(m; \mathbf{n}; \mathbf{p})$  строго позиционно определена.

С помощью формализованного описания кинематическая структура произвольного разомкнутого механизма преобразуется в набор исходных данных программного средства для автоматизированного формирования уравнений кинематики. С этой целью кинематическая схема механизма представляется в виде последовательности характеристических точек. Каждая такая точка является началом относительной системы координат. Исходную точку, относительно которой формируются уравнения кинематики, принято называть базовой точкой, определяющей расположение базовой (абсолютной) системы координат. Параметры формализованного описания содержат всю необходимую информацию для построения однородных матриц преобразования систем координат для перемещения между точками и в дальнейшем – для формирования уравнений кинематики.

Алгоритм разработанного программного средства для расчета уравнений кинематики КБС представлен на рис. 1. Программа позволяет получать уравнения кинематики для подобных механизмов как в численной, так и в аналитической форме.

Как уже было упомянуто выше, исходными данными для получения кинематической модели и формирования уравнений кинематики раскрытия солнечных батарей является формализованное описание КБС. Уравнения кинематики КБС КА определяют движение панелей солнечных батарей в каждой фазе раскрытия. С этой целью необходимо задавать соответствующие параметры вычисления для получения уравнений определенной фазы раскрытия панелей.

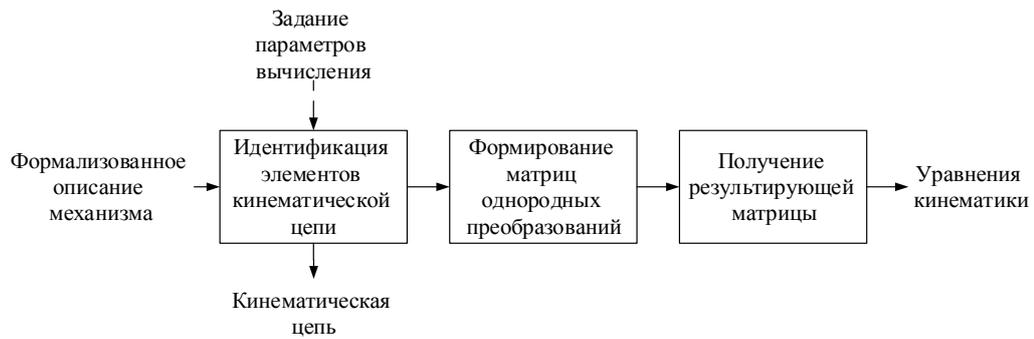


Рис. 1. Алгоритм работы программного средства для формирования уравнений кинематики

После формализованного описания элементов КБС, следующим этапом является формирование уравнений кинематики, который сводится к формированию матриц однородных преобразований размерностью  $4 \times 4$  и расчету результирующей матрицы, которая содержит в себе данные о взаимном расположении абсолютных (связанных с основанием) и рабочих координатных осей. Для формирования матриц, последовательность формализованно описанных сочленений и звеньев разделяется на отдельные группы, чтобы для каждой группы можно было сформировать одну или несколько матриц однородных преобразований. К примеру, для перехода между системами координат двух соседних сочленений необходимо осуществить несколько поворотов и перенос системы координатных осей из одной характеристической точки в другую. Для этого используются конструктивные параметры поворота осей системы координат вокруг осей  $x$  ( $\alpha_1$ ) и  $y$  ( $\beta_1$ ), перенос вдоль оси  $z$  ( $L$ ) и вращение системы координат до ее совмещения с осями системы сочленения ( $\alpha_2, \beta_2$ ). Матрица такого перехода определяется следующим образом:

$$T(R_x(\alpha_1), R_y(\beta_1), L, R_x(\alpha_2), R_y(\beta_2)),$$

где  $R_x(\alpha_n)$  – матрица поворота вокруг оси  $x$  на угол  $\alpha_n$ ;

$R_y(\beta_n)$  – матрица поворота вокруг оси  $y$  на угол  $\beta_n$ .

## 2 ФОРМИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЙ КБС

Внешний вид КБС, соответствующего по конструктивному исполнению используемой на КА «Экспресс» в раскрытом состоянии представлен на рис. 2 [6]. В раскрытом положении определены и отмечены на рисунке характеристические точки: 1 – точка подвеса рамы КБС; 2–4 – точки подвеса корневой, промежуточной и концевой панелей; 5, 6 – центры масс боковых панелей. Предполагается, что в указанных точках осуществляется подвес элементов КБС на обезвешивающем испытательном стенде с целью повторения движений поэтапного раскрытия крыла для имитации состояния невесомости.

Формализованное описание КБС помимо взаимного расположения характеристических точек 1–6 и шарнирных узлов (ШУ) содержит также информацию о движении системы на этапах раскрытия:  $\gamma_1$ – $\gamma_6$  – углы раскрытия элементов КБС 1–6. Раскрытие КБС происходит в 2 фазы.

На этапе первой фазы одновременно раскрываются рама, корневая, промежуточная и концевая панели БС. Таким образом, все ШУ закрыты, открываются ШУ рамы и раскрываемых панелей. Боковые панели находятся в закрытом состоянии. Согласно 1-й фазе раскрытия КБС также не сложно определить взаимное отношение между углами ШУ в исходном состоянии КБС:

$$\gamma = \gamma_1 = -\gamma_2 = \gamma_3 = -\gamma_4.$$

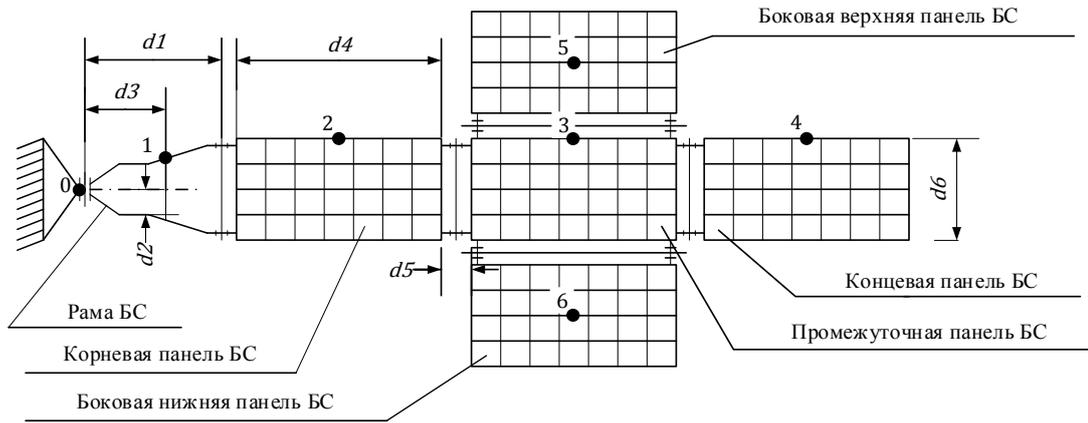


Рис. 2. КБС в раскрытом состоянии

В качестве примера рассмотрим процесс формирования формализованного описания и вывода уравнений кинематики для точки подвеса корневой панели КБС на первой фазе раскрытия. Формализованное описание точки подвеса панели:

$$\begin{aligned}
 &LOR(1; 10; 0; 0; 0; 0); \\
 &LRR(2; 10; 20; R_x(-90^0); 0; L_z(d_3); R_x(90^0); 0); \\
 &LRN(3; 20; 30; R_x(-90^0); 0; L_z(d_4/2); R_x(90^0); 0); \\
 &LNN(4; 30; 40; 0; 0; L_z(d_6/2); 0; 0); \\
 &J1R(10; 1; 2; 180; 0; 180; h_1); \\
 &J1R(20; 2; 3; 180; 0; 180; h_2).
 \end{aligned}$$

Методика формирования формализованного описания подробно описана в [3, 4]. Дополнительным параметром здесь является смещение вращательных осей в ШУ КБС (смещение  $h$  на рис. 3).

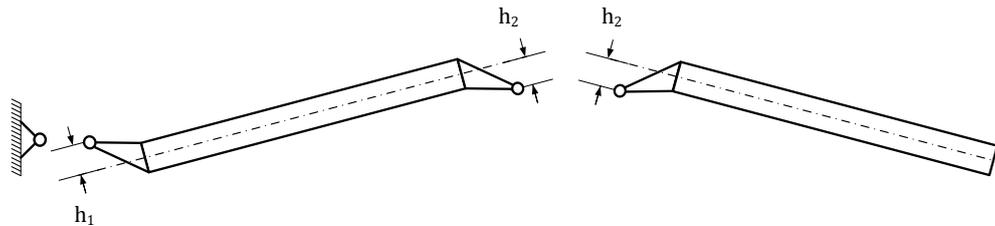


Рис. 3. Схема механической системы раскрытия КБС

При автоматизированном формировании уравнений кинематики смещение осей ШУ элиминируется путем дополнительных переходов трехгранников осей. В результате результирующая матрица в точке подвеса рамы будет получена следующим образом:

$$\begin{aligned}
 T_{\text{панели}} = &T_1 \{0\} \cdot T_{10} \{R_z(\gamma), L_z(h_1)\} \cdot T_2 \{R_x(-90^0), L_z(d_1), R_x(90^0)\} \cdot T_{20} \{R_z(\gamma), L_z(h_2)\} \cdot \\
 &\cdot T_3 \{R_x(-90^0), L_z(d_4/2), R_x(90^0)\} \cdot T_4 \{L_z(d_6/2)\}.
 \end{aligned}$$

Используя разработанное программное средство и сформированное формализованное описание, получаем уравнения кинематики корневой панели в первой фазе раскрытия.

$$x_2(\gamma) = \left(d_1 - \frac{d_4}{2}\right) \cdot \cos(\gamma) - 2 \cdot h_2 \sin(\gamma) + h_1;$$

$$y_2(\gamma) = \left(d_1 + \frac{d_4}{2}\right) \cdot \sin(\gamma) + 2 \cdot h_2 \cos(\gamma) + h_1;$$

$$z_2(\gamma) = \frac{d_6}{2}.$$

Аналогичным образом, формируется формализованное описание остальных элементов КБС и рассчитываются уравнения кинематики оставшихся точек подвеса.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате получится кинематическая модель КБС, описывающая положение всех точек подвеса элементов крыла в двух фазах раскрытия. Предложенный способ формализованного описания и получения уравнений кинематики КБС является универсальным и применим к любой модели исполнения механизма раскрытия КБС, а также, в случае возникновения необходимости, может быть адаптирован под любые особенности кинематики механической системы. Универсальный подход к решению подобного рода задач играет огромную роль в автоматизации процесса математического описания кинематики механизмов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романенко И.В. Улучшение методики испытаний механических систем космических аппаратов // Труды Московского авиационного института. Выпуск № 80. Электронный журнал. 2015 г.
2. Михалкин В.М., Романенко И.В. Анализ применимости системы обезвешивания пассивного типа для крупногабаритного крыла батареи солнечной // Материалы XVII международной научной конференции «Решетнёвские чтения». Красноярск, 14 ноября 2013, Ч.1, С. 88–89.
3. Малышенко А.М. Формализованное описание структур и параметров кинематических цепей манипуляторов // Известия АН СССР. Машиноведение № 4, 1989 г. – С. 61–67.
4. Yakovlev A., Malysenko A. Automatic derivation of kinematic equations for robotic manipulators on the bases of formalised description of their kinematic chains. The 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2014), IEEE Computer Society. Bangladesh. (October 21–23, 2014).
5. Яковлев А.С., Малышенко А.М. Программное обеспечение для автоматического формирования моделей кинематики в символьной и численной формах для механизмов с разомкнутыми кинематическими цепями и сочленениями третьего, четвертого и пятого классов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013615109 от 28 мая 2013 г.
6. Проекты компании «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва». Раздел: телекоммуникация. Рабочая ссылка: <https://www.iss-reshetnev.ru/projects>.