

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОГО ТРЕНАЖЕРА

Мудров А.П.\* , Фаизов М.Р.\*\*

*Казанский национальный исследовательский технический университет**им. А.Н. Туполева — КАИ,**КНИТУ-КАИ, ул. К. Маркса, 10, Казань, 420111, Россия**\* e-mail: Mudrov.alex@yandex.ru**\*\* e-mail: faizovmarat92@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 19.11.2018

Представлен сферический механизм, позволяющий производить пространственные движения по сфере. Для механизма создается 3D-модель в программе SolidWorks. С помощью данной модели можно синтезировать и проверить структуру механизма. Произведен расчет углового перемещения, скорости и ускорения шатуна с центральной точки звена и ползуна самого механизма. Произведен расчет центральной точки с учетом малой и большой толщины звеньев механизма. Расчеты произведены для всех углов между звеньями, которые применялись при расчете сферического механизма с двумя степенями свободы. На основе полученной математической модели был произведен расчет момента инерции от заданного движения кривошипа. Определены параметры движения по координатным осям, что позволит использовать формулы направляющих косинусов. Произведен расчет дополнительных углов, применяющихся при создании математической модели для момента инерции, полученных из пространственной сферы вокруг механизма. Получен момент мгновенного вращения данного механизма, задано определенное движение механизма, задан промежуток времени его движения. Графики получены для сравнения двух методов и отражают движение самого шатуна и ползуна механизма. Также с помощью Maple проверен расчет движения с моментом инерции самого механизма, с заданной различной массой, но с определенными геометрическими параметрами звеньев механизма.

*Ключевые слова:* кривошипно-ползунный механизм, кривошипно-шатунный механизм, момент инерции.

**Введение**

Аэрокосмическая отрасль развивается в наше время с хорошей динамикой. Особое внимание уделяется применению механических приводов в аэрокосмонавтике [1]. Разрабатывают новые авиационные аппараты для более длительных и безопасных полетов [2, 3]. Проводят анализ для эксплуатации и управления полетами [4–6]. Стремятся создать аппараты, которые будут гарантировать надежность с большой производительностью, но с малым энергопотреблением [7–9].

Пространственные механизмы можно успешно применять в роли механических приводов. Исследователи всего мира пытаются их реализовать в полной мере [10–12]. Изучение и разработка данных механизмов приводят к созданию нового оборудования и приборов, и не только в космонавтике [13–15]. Особое внимание уделяют механизму Беннета [16–18]. Меньше изучены сферические механизмы [19], особенно сферические

механизмы с двумя степенями свободы. На основе сферического механизма с двумя степенями свободы был смоделирован сферический тренажер вестибулярного аппарата (рис. 1). Сферические механизмы с двумя степенями свободы имеют свои особенности, которые исследователи часто недооценивают [20]. Для изучения сферического механизма определим, из чего состоит тренажер. Мотор-редуктор ведущего кривошипа 1 установлен на стойку 11. Мотор-редуктор соединен с валом 2, на котором установлена шестерня 3, входящая в зацепление зубчатого колеса 4. Зубчатое колесо установлено на полый вал 5, который соединен с мотор-редуктором 12. Полый вал соединен с ведущим кривошипом 6, который соединен с шатуном 7. Капсула 8 закреплена между ведущим стержнем 9 и шатуном 7; ведущий стержень соединен с центральным валом 10, который посажен на привод 12. Для изучения сферического механизма с двумя степенями свободы целесообразно

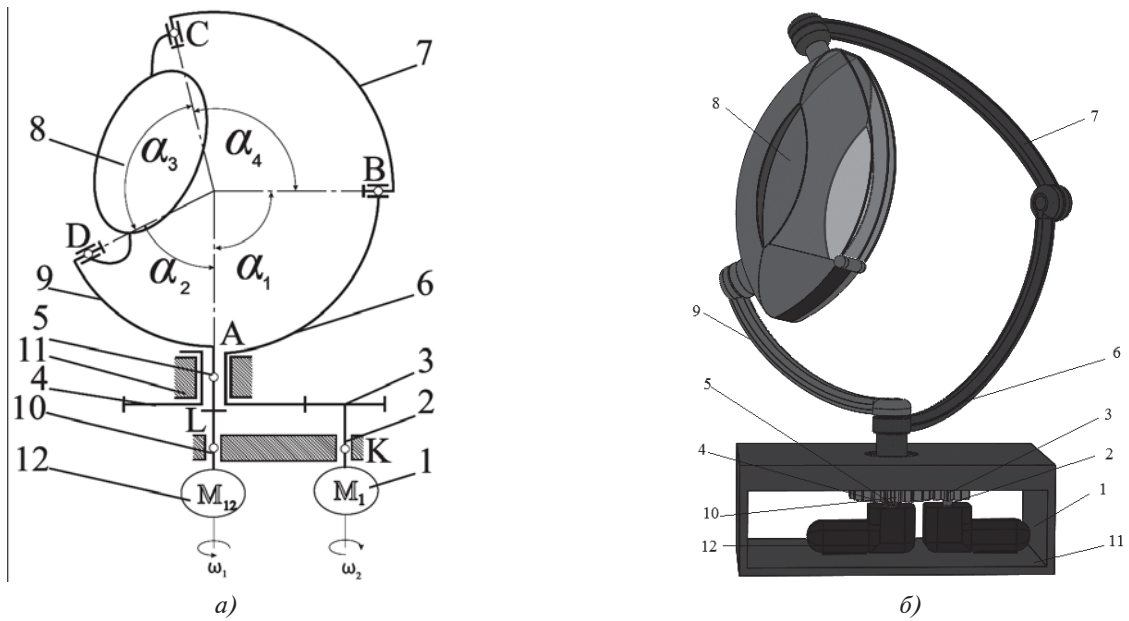


Рис. 1. Структурная схема (а) и 3D-модель (б) сферического тренажера

разно исследовать простой одноподвижный сферический кривошипно-ползунный механизм.

**Структура кривошипно-шатунного механизма**

Наиболее простой сферический механизм, содержащий только одноподвижные вращательные пары, состоит из четырех звеньев [15]. Рассмотрим центральный кривошипно-шатунный механизм (рис. 2). Кривошипно-шатунный механизм состоит из стойки 1, кривошипа 2, шатуна 3, ползуна 4;  $\alpha_2 = 30^\circ$  и  $\alpha_3 = 120^\circ$  — центральные углы, определяющие длины кривошипа и шатуна.

**Кинематика сферического кривошипно-ползунного механизма**

Для кинематического анализа указанного механизма сначала определяем положение выходного звена 3 :

$$\sin \alpha_3 \sin \varphi_3 = \sin \alpha_2 \cos \alpha \sin \varphi_2 + \sin \alpha \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_2 \sin^2 \varphi_2}. \quad (1)$$

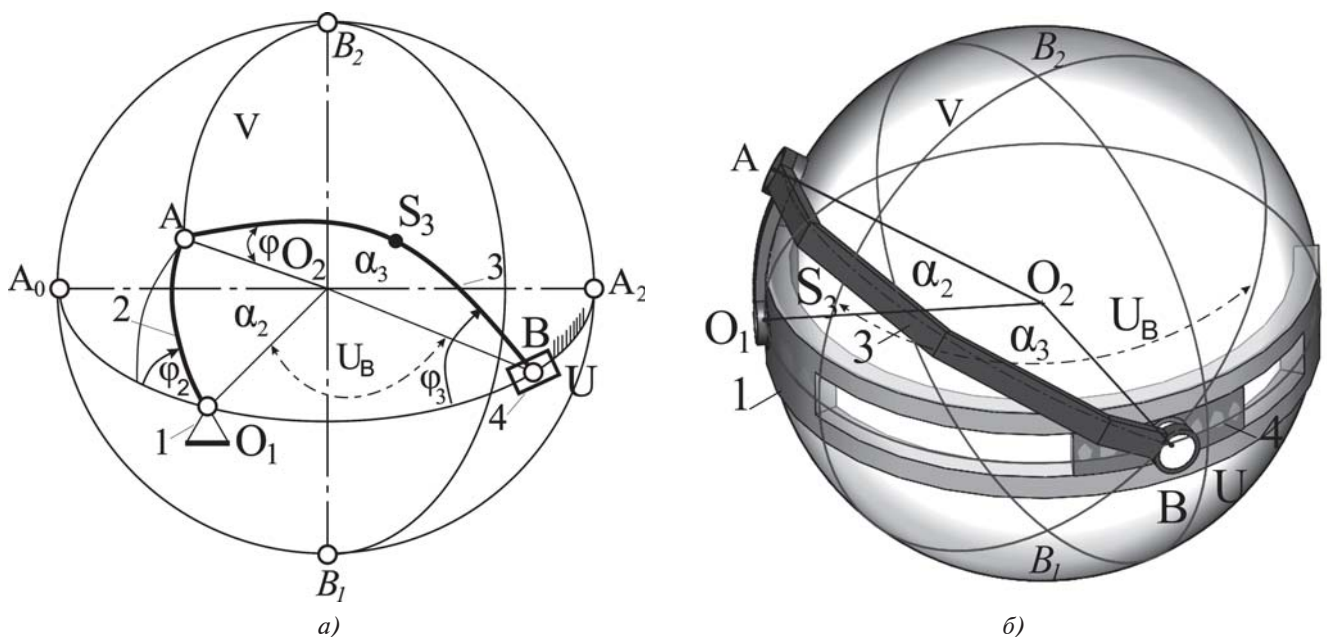


Рис. 2. Структурная схема (а) и 3D-модель (б) сферического механизма

Выведем зависимость угла  $\varphi_3$  от  $\varphi_2$ :

$$\varphi_3 = \arcsin \left( \frac{\sin \alpha_2 \cos \alpha \sin \varphi_2 + \sin \alpha \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_2 \sin^2 \varphi_2}}{\sin \alpha_3} \right). \quad (2)$$

Угловая скорость определяется дифференцированием выражения (2) по обобщенной координате  $\varphi_2$ :

$$\varphi_3' = \frac{\sin \alpha_2 \cos \alpha \cos \varphi_2 - \frac{\sin \alpha \sin^2 \alpha_2 \sin \varphi_2 \cos \varphi_2}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_2 \sin^2 \varphi_2}}}{\sin \alpha_3 \sqrt{1 - \frac{(\sin \alpha_2 \cos \alpha \sin \varphi_2 + \sin \alpha \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_2 \sin^2 \varphi_2})^2}{\sin^4 \alpha_3}}}. \quad (3)$$

Угловое ускорение определяется дифференцированием выражения (3) по обобщенной координате  $\varphi_2$ :

$$\begin{aligned} \varphi_3'' = & \frac{-\sin \alpha_2 \cos \alpha \cos \varphi_2 - \frac{\sin \alpha \sin^4 \alpha_2 \sin^2 \varphi_2}{\sqrt[3]{1 - \sin^2 \alpha_2 \sin^2 \varphi_2}} - \frac{\sin \alpha \sin^2 \varphi_2}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_2 \sin^2 \varphi_2}} +}{-\sin \alpha_2 \cos \alpha \sin \varphi_2 - \frac{\sin \alpha \sin^4 \alpha_2 \sin^2 \varphi_2}{\sqrt[3]{1 - \sin^2 \alpha_2 \sin^2 \varphi_2}} - \frac{\sin \alpha \sin^2 \varphi_2}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_2 \sin^2 \varphi_2}} +} \\ & + \frac{\frac{\sin \alpha \sin^2 \alpha_2 \sin^2 \varphi_2}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_2 \sin^2 \varphi_2}}}{\sin^3 \alpha_3 \sqrt{1 - \frac{(\sin \alpha_2 \cos \alpha \sin \varphi_2 + \sin \alpha \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_2 \sin^2 \varphi_2})^2}{\sin^2 \alpha_3}}} + \frac{\left( \sin \alpha_2 \cos \alpha \cos \varphi_2 - \frac{\sin \alpha \sin^2 \alpha_2 \sin \varphi_2 \cos \varphi_2}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_2 \sin^2 \varphi_2}} \right)^2}{\sin^3 \alpha_3 \sqrt[3]{1 - \frac{(\sin \alpha_2 \cos \alpha \sin \varphi_2 + \sin \alpha \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_2 \sin^2 \varphi_2})^2}{\sin^2 \alpha_3}}}. \quad (4) \end{aligned}$$

Расстояние  $U_B$  определяет положение ползуна 4 (точка B):

$$U_B = \arctan(\tan \alpha_3 \cdot \cos \varphi_3) - \arctan(\tan \alpha_2 \cdot \cos \varphi_2). \quad (5)$$

Аналог угловой скорости определяется дифференцированием выражения (5) по обобщенной координате  $\varphi_2$ :

$$U_B' = \frac{\tan \alpha_2 \cdot \sin \varphi_2}{1 + \tan^2 \alpha_2 \cdot \cos \varphi_2}. \quad (6)$$

Аналог углового ускорения определяется дифференцированием выражения (6) по обобщенной координате  $\varphi_2$ :

$$U_B'' = \frac{\tan \alpha_2 \cdot \cos \varphi_2}{1 + \tan^2 \alpha_2 \cdot \cos^2 \varphi_2} + \frac{2 \tan^3 \alpha_2 \cdot \sin^2 \varphi_2 \cdot \cos \varphi_2}{(1 + \tan^2 \alpha_2 \cdot \cos \varphi_2)^2}. \quad (7)$$

Положение точки  $S_3$ , являющейся центром тяжести звена BC, когда оно большой толщины, относительно географических координат DAV определяется следующим выражением:

$$\cos l_{S_3} = \cos U_{S_3} \cdot \cos V_{S_3}; \quad (8)$$

$$l_{S_3} = \arccos(\cos U_{S_3} \cdot \cos V_{S_3}). \quad (9)$$

Скорость точки  $S_3$ , являющейся центром тяжести звена  $AB$ , когда оно большой толщины, относительно географических координат  $UOV$  определяется дифференцированием выражения (9) по обобщенной координате  $\varphi_2$ :

$$l'_{S_3} = \sin(-\arctan(\tan \alpha_3 \cdot \cos \varphi) + \arctan(\tan \frac{\alpha_3}{2} \cdot \cos \varphi_2)) \cdot \tan \alpha_2 \cdot \sin \varphi_2 \sqrt{1 - \sin^2 \left(\frac{\alpha_3}{2}\right) \sin^2 \varphi_3} / (1 + \tan^2 \alpha_2 \cdot \cos^2 \varphi_2) \cdot \sqrt{1 - \cos(1 - \cos(-\arctan(\tan \alpha_3 \cdot \cos \varphi) + \arctan(\tan \frac{\alpha_3}{2} \cdot \cos \varphi_2))) + \arctan(\tan \alpha_2 \cdot \cos \varphi_2)^2 \left(1 - \sin \frac{\alpha_3}{2}\right)^2 \cdot \sin^2 \varphi_3}^2}. \quad (10)$$

Ускорение точки  $S_3$  звена  $AB$  определяется дифференцированием:

$$l''_{S_3} = (l'_{S_3})'.$$

А при малой толщине звена  $AB$  положение точки  $S'_3$  можно определить соотношением

$$\cos l_{S'_3} = \cos U_{S'_3} \cos V_{S'_3}. \quad (11)$$

В формулах (8) и (11) расстояния  $U_{S_3}, U_{S'_3}, V_{S_3}, V_{S'_3}$  имеют вид

$$U_{S_3} = \arctan(\tan \alpha_3 \cdot \cos \varphi) - \arctan\left(\tan \frac{\alpha_3}{2} \cdot \cos \varphi_3\right) - \arctan(\tan \alpha_2 \cdot \cos \varphi_2); \quad (12)$$

$$V_{S_3} = S_3 L = \arcsin\left(\sin \frac{\alpha_3}{2} \cdot \sin \varphi_3\right); \quad (13)$$

$$U_{S'_3} = U_{S_3} - \arctan\left(\frac{3}{5} \sin \frac{\alpha_3}{2} \cdot \tan \frac{\alpha_3}{4} \cdot \sin \varphi\right); \quad (14)$$

$$V_{S'_3} = V_{S_3} - \arcsin\left(\frac{3}{5} \sin \frac{\alpha_3}{2} \cdot \tan \frac{\alpha_3}{4} \cdot \cos \varphi\right). \quad (15)$$

Угол  $\varphi$  определяет движение между звеном  $O_1A$  и  $AB$ :

$$\varphi = \arcsin \left[ \frac{\sin(\alpha + \arcsin(\alpha_2 \cdot \sin \varphi_2)) - \arcsin\left(\sin \frac{\alpha_3}{2} \cdot \sin \varphi_3\right)}{\sin \frac{\alpha_3}{2}} \right]. \quad (16)$$

Аналоги угловых линейных скоростей определяются дифференцированием выражений (8) и (11):

$$V_{S_3(\varphi_2)} = \frac{U'_{S_3} \sin U_{S_3} \cdot \cos V_{S_3} + V'_{S_3} \sin V_{S_3} \cdot \cos U_{S_3}}{\sin I_{S_3}}; \quad (17)$$

$$V_{S'_3(\varphi_2)} = \frac{U'_{S'_3} \sin U_{S'_3} \cdot \cos V_{S'_3} + V'_{S'_3} \sin V_{S'_3} \cdot \cos U_{S'_3}}{\sin I_{S'_3}}, \quad (18)$$

где  $U'_{S_3}, U'_{S'_3}, V'_{S_3}, V'_{S'_3}$  — производные величин  $U_{S_3}, U_{S'_3}, V_{S_3}, V_{S'_3}$  по обобщенной координате.

Для получения расчетных формул, определяющих реальные значения линейных скоростей точек  $S_3, S'_3$ , можно продифференцировать выражения (11)—(14) по времени  $t$ :

$$\dot{V}_{S_3} = p \cdot \omega_2 ([\sin V_1 \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_2 \cdot \sin^2 \varphi_2} + \cos V_1 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \sin \varphi_2] - \sin V_3) \cos \alpha_3; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{S_3} = & p \cdot \omega_2 (\sin^2 \alpha_3 - \sin \alpha_3 \cos V_3 [\sin V_1 \times \\ & \times \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_2 \cdot \sin^2 \varphi_2} + \cos V_1 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \sin \varphi_2] - \\ & - [\sin V_1 \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_2 \cdot \sin^2 \varphi_2} + \\ & + \cos V_1 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \sin \varphi_2]^2 - \sin V_3^2); \end{aligned} \quad (20)$$

$$V_{S_3} = \sqrt{\dot{U}_{S_3}^2 + \dot{V}_{S_3}^2}. \quad (21)$$

Угловое ускорение звеньев 3 и 4 можно найти дифференцированием формул по времени  $t$ :

$$\epsilon_2 = \omega_1^2 \phi_3'' + \epsilon_1 \phi_3'; \quad (22)$$

$$\epsilon_3 = \omega_1^2 D_3'' + \epsilon_1 D_3'; \quad (23)$$

где  $\phi_3'', U_B''$  — аналоги угловых ускорений;  $\omega_1$  — угловая скорость входного звена;  $\epsilon_1$  — угловое ускорение входного звена  $I$ .

Рис. 3 и 4 демонстрируют движение шатуна и ползуна самого механизма с заданными параметрами. Пунктирной линией на всех рисунках показаны угловое перемещение, скорость и ускоре-

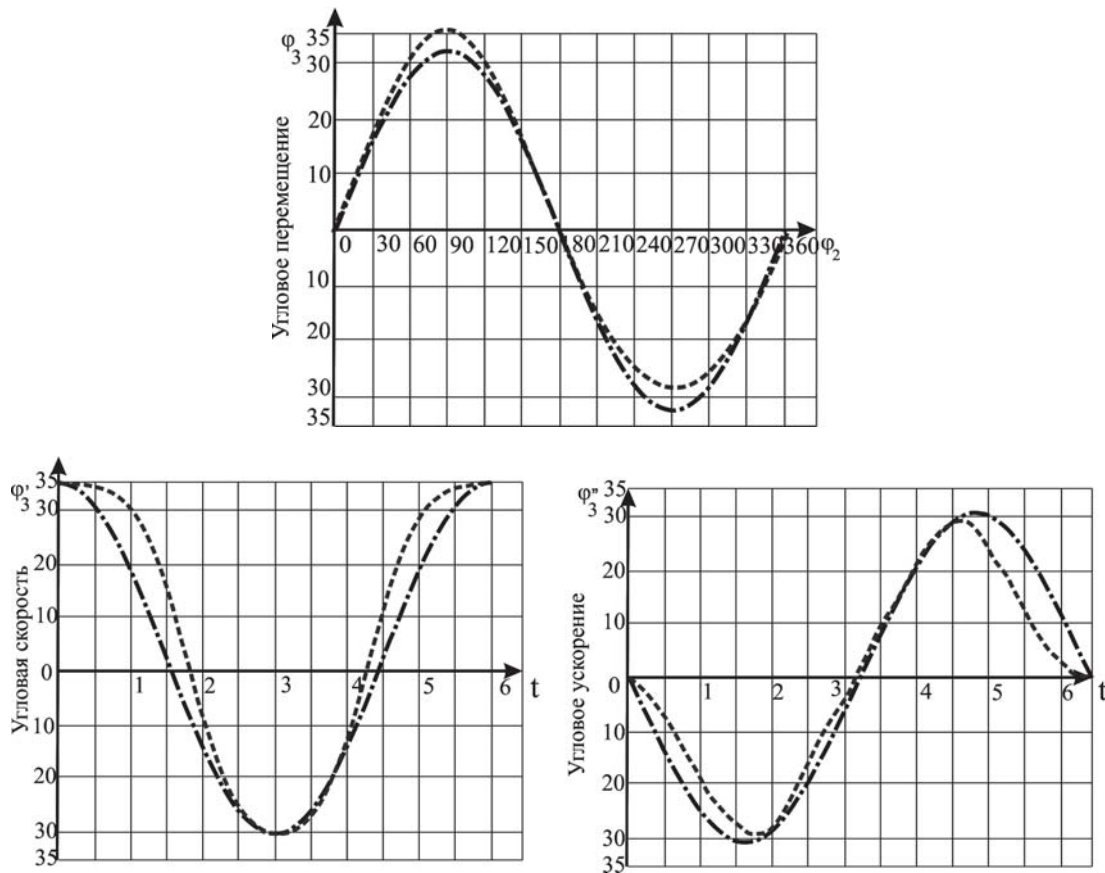


Рис. 3. Графики, полученные в программах Maple и SolidWorks для шатуна

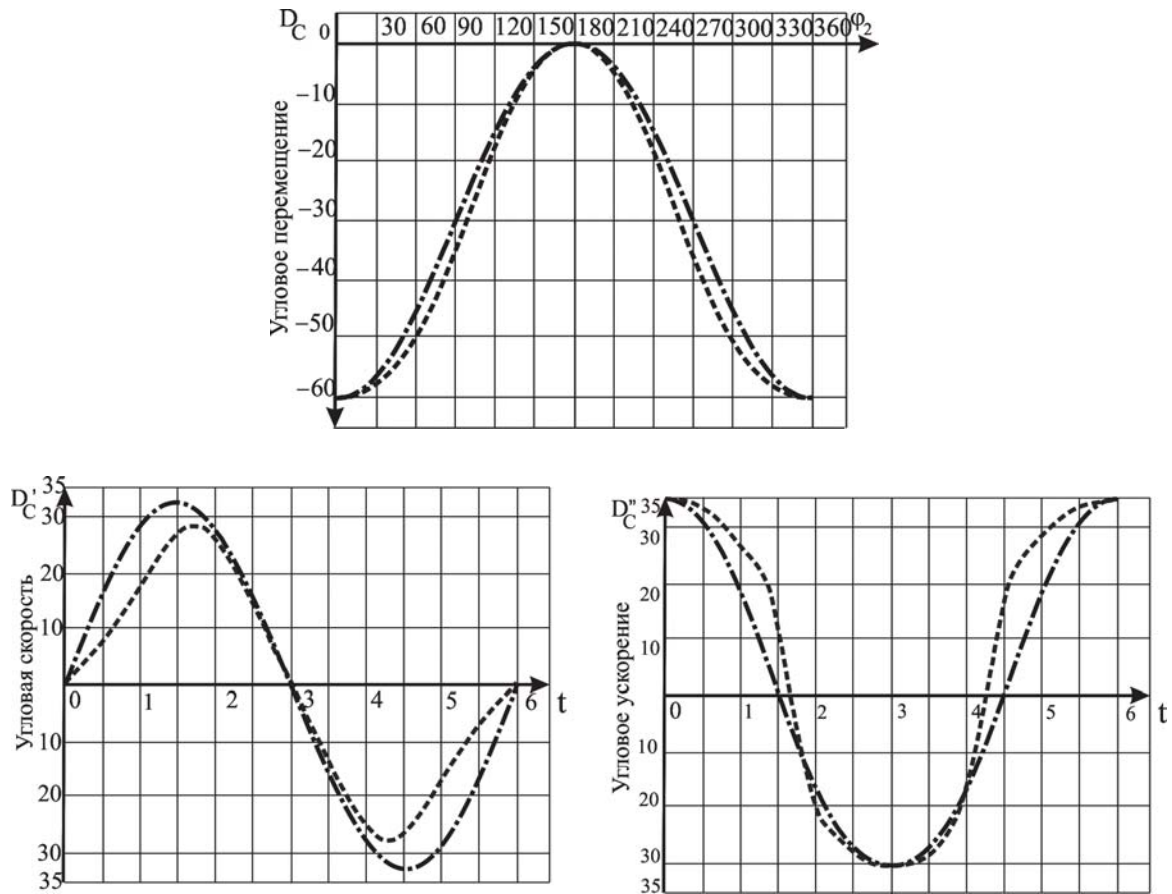


Рис. 4. Графики, полученные в программах Maple и SolidWorks для ползуна

ние. Графики выполнены в программе SolidWorks. Линия тире—точка показывает кинематику механизма в программе Maple.

**Момент инерции кривошипно-ползунного механизма**

В общем случае момент инерции звеньев *AB* и *BC* (шатун) сферического механизма можно определить по формуле

$$I_{\Delta} = Al^2 + Bm^2 + Cn^2 - 2Dln - 2Emn - 2Flm, \quad (24)$$

где  $l = \cos \alpha$ ,  $m = \cos \beta$ ,  $n = \cos \gamma$  — направляющие косинусы.

В каждой точке можно построить главные оси инерции *OX*, *OY* и *OZ* таким образом, чтобы центробежные моменты инерции были равны нулю. Они зависят не только от направления координатных осей, но и от выбора начала координат. Поэтому, когда говорят о центробежных моментах инерции в данной точке, под этим понимается, что начало координат совпадает с данной точкой.

Если  $I_{XZ} = I_{YZ} = 0$ , ось *Z* — главная ось инерции тела, т.е. главная ось (главная центральная ось) инерции проходит через центр масс тела.

Таким образом, используя свойства главных осей инерции, можно сферический шатун, имеющий однородную форму и большую толщину, рассмотреть относительно главной центральной оси, которая будет проходить через точку *S<sub>3</sub>*. В этом случае центробежные моменты инерции

$$I_{XY} = I_{XZ} = 0 \text{ и } I_{YZ} = 0.$$

Тогда формула (11) примет вид

$$I_{\Delta} = I_X \cos^2 \alpha + I_Y \cos^2 \beta + I_Z \cos^2 \gamma. \quad (25)$$

В дальнейшем для определения момента инерции сферических звеньев, совершающих сложное движение, будем использовать лишь формулу (25).

Определим углы  $\alpha, \beta, \gamma$ .

Для звена *AB* рассматриваемого механизма (рис. 5) и мгновенного центра вращения *P* найдем значения *AP*, *PB* и  $\delta$ :

$$AP = \arctan \left( \frac{\sin \gamma_0 \tan \varphi_3 - \cos \gamma_0 \cos \alpha_3}{\sin \alpha_3} \right); \quad (26)$$

$$PB = \arcsin \left( \frac{\sin AP \cdot \sin \gamma_0}{\cos \varphi_3} \right); \quad (27)$$

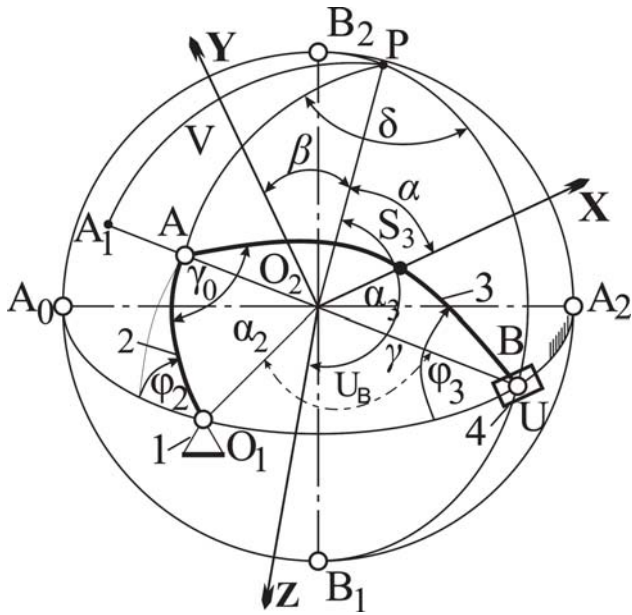


Рис. 5. Схема с координатными осями и углами для сферического кривошипно-ползунного механизма

$$\delta = \arccos\left(\frac{\cos \alpha_3 - \cos AP \cdot \cos PB}{\sin AP \cdot \sin PB}\right), \quad (28)$$

где

$$\gamma_0 = \arccos\left(\frac{\cos \alpha \cdot \cos U_B - \cos \alpha_2 \cdot \cos \alpha_3}{\sin \alpha_2 \cdot \sin \alpha_3}\right). \quad (29)$$

Определим  $\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma$ .

Углы  $\gamma_0, \varphi_3$  и расстояние  $U_B$  определяются из кинематики механизма. Теперь главную центральную ось инерции  $O_2X$  направим так, чтобы она проходила через точку  $S_3$  шатуна  $AB$ , и относительно нее проведем остальные оси. Центр мгновенного вращения  $P$  соединим прямой с центром сферы (началом координатной системы)  $O_2$ . Точку  $S_3$  соединим с центром сферы  $O_2$  прямой  $S_3O_2$ , а с центром мгновенного вращения  $P$  – дугой большой окружности  $PS_3$ . Имеем

$$\cos \alpha = \cos \frac{\alpha_3}{2} \cdot \cos PB + \sin \frac{\alpha_3}{2} \cdot \sin PB \cdot \sin \varphi_3. \quad (30)$$

Для нахождения угла  $\beta$  продолжим дугу  $S_3A$  влево и отложим на ней центральный угол, равный  $\frac{\pi}{2}$  ( $S_3A_1 = \frac{\pi}{2}$ ,  $A_1$  – точка пересечения оси  $O_2Y$  с поверхностью сферы). Соединяя точку  $A_1$  с полюсом  $P$  и центром сферы, можно написать:

$$\begin{aligned} \cos \beta &= -\sin \alpha \cos BSP = \\ &= -\left[\cos \frac{\alpha_3}{2} \cos PB + \sin \frac{\alpha_3}{2} \sin PB \sin \varphi_3\right]^{1/2} \times \\ &\quad \times \cos BSP; \end{aligned} \quad (31)$$

$$\cos BSP = \left(\cos PB - \cos \frac{\alpha_3}{2} \cdot \cos \alpha\right) \left(\sin \frac{\alpha_3}{2} \cdot \sin \alpha\right)^{-1}. \quad (32)$$

Угол  $\gamma$  можно определить через угол  $\varphi_3$ :

$$\begin{aligned} \cos \gamma = -\sin \alpha = & -\left[1 - \left(\cos \frac{\alpha_3}{2} \cos PB + \right. \right. \\ & \left. \left. + \sin \frac{\alpha_3}{2} + \sin \frac{\alpha_3}{2} \sin PB \sin \varphi_3\right)^2\right]. \end{aligned} \quad (33)$$

Зависимости момента инерции сферического кривошипно-ползунного механизма от угла  $\varphi_2$ , полученные для заданного промежутка времени в программе Maple (линия точка–тире) и в программе SolidWorks (3D-модель, пунктирная линия), представлены на рис. 6.

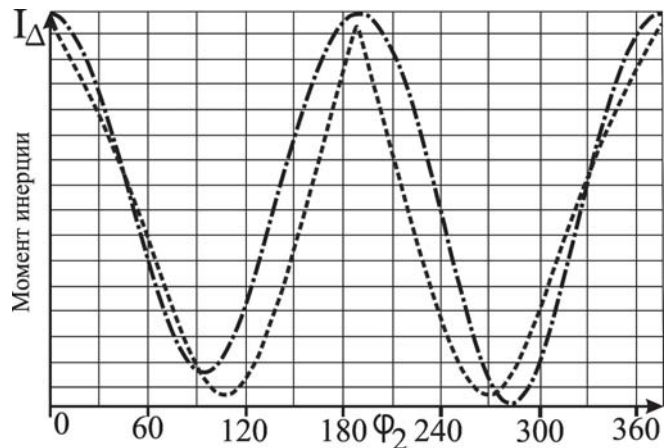


Рис. 6. Графики расчетов в программах Maple и SolidWorks

### Выводы

Спроектирован сферический четырехзвенный кривошипно-шатунный механизм в системе SolidWorks. Синтезирован сферический кривошипно-ползунный механизм, с точкой пересечения осей шарниров в центре базовой сферы. Произведен кинематический анализ с помощью формул и проверен в программе Maple. Получены графики зависимостей углового перемещения, угловой скорости и ускорения шатуна и ползуна в программах Maple и SolidWorks. Произведено сравнение графиков из расчетов математической модели и спроектированной 3D-модели. Также с помощью кинематического анализа был исследован момент инерции механизма. Результаты показали, что сферический кривошипно-ползунный механизм прост по своей структуре и сборке. Для исследования сферического механизма с

двумя степенями свободы достаточно рассмотреть одноподвижный кривошипно-балансирный сферический механизм

*Данная разработка проводится при финансировании Фонда содействия инновациям на основе гранта УМНИК 2017 г.*

### Библиографический список

1. Балковой Н.Н. Анализ особенностей применения двигателей-маховиков с компенсацией собственных помеховых моментов // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 3. С. 203-211.
2. Маленков А.А. Выбор проектных решений при проектировании системы беспилотных летательных аппаратов в условиях многоцелевой неопределенности // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 7-15.
3. Неделько Д.В., Сафиуллин А.Ф. Применение метода конечных элементов для определения параметров приведения самолетов и вертолетов различного типа // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 61-72.
4. Спириин А.И. Анализ полетных данных как основа для принятия операционных решений по эксплуатации долговременных орбитальных станций // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 139-151.
5. Лебедева Н.В., Соловьев С.В. Использование интеллектуальных систем при оперативном управлении полётом космических аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 152-159.
6. Пашко А.Д., Беличук А.А. Разработка системы активной защиты самолета от управляемых ракет и оценка перспектив ее применения // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 25-36.
7. Хмельницкий Я.А., Салина М.С., Катаев Ю.П. Динамический расчет солнечных батарей космических аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 52-60.
8. Головнин С.М. Риск потери навыка решения проблем пилотами гражданской авиации в условиях неопределённости // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 184-190.
9. Калугина М.С., Ремшев Е.Ю., Данилин Г.А., Воробьева Г.А., Тельнов А.К. Способ упрочнения легких сплавов аэротермоакустической обработкой в авиационном ракетостроении // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 230-239.
10. Верещагин Ю.О. Способ адаптивного управления элеронами палубного самолета // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 3. С. 78-82.
11. Попов А.С. Анализ возможности использования расталкиваемой двухмассовой космической системы с периодически формируемой связью для межорбитальных перелетов // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 3. С. 72-77.
12. Пашко А.Д., Донцов А.А. Методика расчета ошибок определения траектории управляемой ракеты и параметров движения активного элемента защиты // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 3. С. 60-71.
13. Чухлебов Р.В., Лошкарев А.Н., Сидоренко А.С., Дмитриев В.Г. Экспериментальное исследование вибрации конструкции авиационного изделия при действии полетных нагрузок // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 3. С. 51-59.
14. Гоца Д.А. Разработка и исследование лабораторной модели термokatалитического двигателя малой тяги на экологически чистом монотопливе // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 3. С. 34-42.
15. Комов А.А. Повышение конкурентоспособности самолета Ил-76МД-90А // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 3. С. 7-12.
16. Манвелидзе А.Б. Анализ состояния и прогноз списания эксплуатируемых воздушных судов // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 4. С. 226-234.
17. Яруллин М.Г., Хабибуллин Ф.Ф. Конструктивные особенности ненулевых звеньев механизма Беннетта // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2018. Т. 74. № 1. С. 113-118.
18. Яруллин М.Г., Хабибуллин Ф.Ф., Мудров А.П. К вопросу о синтезе модификаций механизма Беннетта // Современное машиностроение. Наука и образование. 2018. № 7. С. 230-244. DOI: 10.1872/MMF-2018-20
19. Яруллин М.Г., Исянов И.Р. Структурное исследование двухподвижного пятизвенного пространственного механизма со сдвоенным кривошипом // Современное машиностроение. Наука и образование. 2017. № 6. С. 239-249. DOI: 10.1872/MMF-2017-20
20. Яруллин М.Г., Мудров А.П., Фаизов М.Р. Синтез сферического кривошипно-ползунного механизма и его кинематический анализ // Современное машиностроение. Наука и образование. 2018. С. 219-229. DOI: 10.1872/MMF-2018-19



## A SPHERICAL SIMULATOR MOTION STUDY

Mudrov A.P.<sup>\*</sup>, Faizov M.R.<sup>\*\*</sup>

Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev - KAI,  
KNRTU-KAI, 10, K. Marx str., Kazan, 420111, Tatarstan, Russia

<sup>\*</sup> e-mail: Mudrov.alex@yandex.ru

<sup>\*\*</sup> e-mail: faizovmarat92@gmail.com

## Abstract

The article presents a spherical mechanism allowing perform spatial movements along a sphere. A 3D model of the mechanism was developed with the SolidWorks software. The model allows synthesize and examine the mechanism structure. Computing of the angular displacement, speed and acceleration of the connecting rod from the center point of the link and the slide of the mechanism itself was performed. The center point calculation was performed with account for the small and large thickness of the mechanism links. Calculations were made for all angles between the links, which were employed for calculation of the spherical mechanism with two degrees of freedom. Based of the obtained mathematical model, computing of the moment of inertia from a given crank motion was performed. The motion parameters along the coordinate axes were determined, which would allow application of the direction cosines formulas. Additional angles calculation used when creating a mathematical model for the moment of inertia were obtained from the spatial sphere around the mechanism. The instant rotation moment of the mechanism was obtained. Using to the obtained data, a certain movement of the mechanism and the time interval of its movement were set, which are reflected by the obtained plots. These plots were obtained for comparing the two methods. The obtained plots reflect the movement of the connecting rod itself, and the slide mechanism. In addition, using Maple, the computation of motion with the moment of inertia of the mechanism itself, with a specified various masses, but with certain geometrical parameters of the mechanism links, was verified.

**Keywords:** crank-slider mechanism, moment of inertia.

## References

1. Balkovoy N.N. Analysis of application specifics of a reaction wheel with intrinsic disturbing moments compensation. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 203-211.
2. Malenkov A.A. Design solutions selection while developing a system of unmanned flying vehicles in conditions of multi-target uncertainty. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 7-15.
3. Nedelko D.V., Safiullin A.F. Finite element method application for determining water landing parameters of airplanes and helicopters of various types. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 61-72.
4. Spirin A.I. Flight data analysis as an operational decisions making basis of the long-term operating orbital stations usage manual. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 139-151.
5. Lebedeva N.V., Solov'ev S.V. Intelligent systems application while spacecraft flight operational control. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 152-159.
6. Pashko A.D., Belichuk A.A. Development of anti-guided missiles active protection system for aircraft and assessment of its application prospects. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 25-36.
7. Khmel'nitskii Y.A., Salina M.S., Kataev Y.A. Spacecraft solar batteries dynamic analysis. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 52-60.
8. Golovnin S.M. Risk of problem solution skills loss by civil aviation pilots in uncertainty conditions. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 184-190.
9. Kalugina M.S., Remshev E.Y., Danilin G.A., Vorob'eva G.A., Telnov A.K. A method of light alloys reinforcing by aero-thermoacoustic treatment for aerospace industry. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 230-239.
10. Vereshchagin Y.O. Deck-based aircraft aileron adaptive control technique. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 3, pp. 78-82.
11. Popov A.S. Analysis of the capacity to use a repulsive two-mass space system with periodically formed coupling to perform interorbital flights. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 3, pp. 72-77.
12. Pashko A.D., Dontsov A.A. Guided missile trajectory and active protection element movement determination errors design procedure. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 3, pp. 60-71.
13. Chukhlebov R.V., Loshkarev A.N., Sidorenko A.S., Dmitriev V.G. Experimental research of an aircraft product's structure vibrations under flight loads action. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 3, pp. 51-59.
14. Goza D.A. Development and investigation of laboratory model low-thrust thermal catalytic thruster on "green propellant". *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 3, pp. 34-42.

15. Komov A.A. IL-76MD-90A aircraft competitiveness recovery. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 3, pp. 7-12.
16. Manvelidze A.B. Status analysis and forecast of operated aircraft writing-off. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 226-234.
17. Yarullin M.G., Khabibullin F.F. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*, 2018, vol. 74, no. 1, pp. 113-118.
18. Yarullin M.G., Khabibullin F.F., Mudrov A.P. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*, 2018, no. 7, pp. 230-244. DOI: 10.1872/MMF-2018-20
19. Yarullin M.G., Isyanov I.R. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*, 2017, no. 6, pp. 239-249. DOI: 10.1872/MMF-2017-20
20. Yarullin M.G., Mudrov A.P., Faizov M.R. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*, 2018, pp. 219-229. DOI: 10.1872/MMF-2018-19