

Алгоритм движения додекапода в прямолинейной цилиндрической трубе переменного сечения

08, август 2013

DOI: 10.7463/0813.0587740

Карпенко А. П., Данг С. Х., Саяпин С. Н.

УДК 519.6

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН)

rk6bmstu@mail.ru

apkarpenko@mail.ru

s.sayapin@rambler.ru

Введение

Благодаря своей универсальности и функциональным возможностям додекапод может быть успешно применен в качестве базового модуля в робототехнических системах, предназначенных для решения широкого круга задач в интересах силовых структур, здравоохранения и экономики страны. При этом додекапод может эксплуатироваться, как индивидуально, так и коллективно, в составе роевых интеллектуальных робототехнических систем, способных самоорганизовываться и объединять додекаподы в пространственные линейные или поверхностные активные структуры для решения широкого круга более сложных задач, например, совместное преодоление препятствий и др. Поэтому исследование функциональных возможностей додекапода актуально.

Додекапод представляет собой односекционный параллельный манипулятор, который можно считать развитием широко известного гексапода или платформы Стюарта [1]. Идея додекапода представлена в работе [2]. В этой работе, а также в работах [3, 4] рассмотрены возможности использования додекапода как мобильного пространственного робота-манипулятора, перемещающегося по сложной поверхности или в трубе переменного профиля. В публикации [5] представлены результаты исследования кинематики додекапода.

В статье рассматривается одна из функциональных возможностей додекапода - движение в прямолинейной цилиндрической трубе постоянного и переменного сечений.

1. Схема додекапода и основные обозначения

Додекапод состоит из шести шарнирных узлов A, B, C, D, E, F и двенадцати штанг переменной длины, соединяющих эти узлы (рисунок 1). Узлы A, B, C и D, E, F определяют две параллельные плоскости. При движении додекапода в цилиндрической трубе, как постоянного, так и переменного сечений, эти тройки узлов играют роль упоров. Когда, например, тройка узлов A, B, C фиксирована, узлы D, E, F могут перемещаться вдоль трубы за счет одновременного изменения длин боковых штанг AD, AE, BD, BF, CE, CF (рисунок 2). Принимаем, что в процессе движения додекапода отсутствует проскальзывание шарниров.

Введем следующие основные обозначения:

l_0, l_m - минимальная и максимальная длины штанг додекапода;

δ - диаметр шарнира додекапода;

l_s - длины штанг на гранях ABC, DEF , когда соответствующие узлы соприкасаются с внутренней поверхностью трубы;

$H_{\delta.min}$ - минимальное расстояние между плоскостями ABC, DEF (когда длины боковых штанг достигают минимальной длины);

$H_{\delta.max}$ - максимальное расстояние между плоскостями ABC, DEF (когда длины боковых штанг достигают максимальной длины);

h_s - шаг движения додекапода.

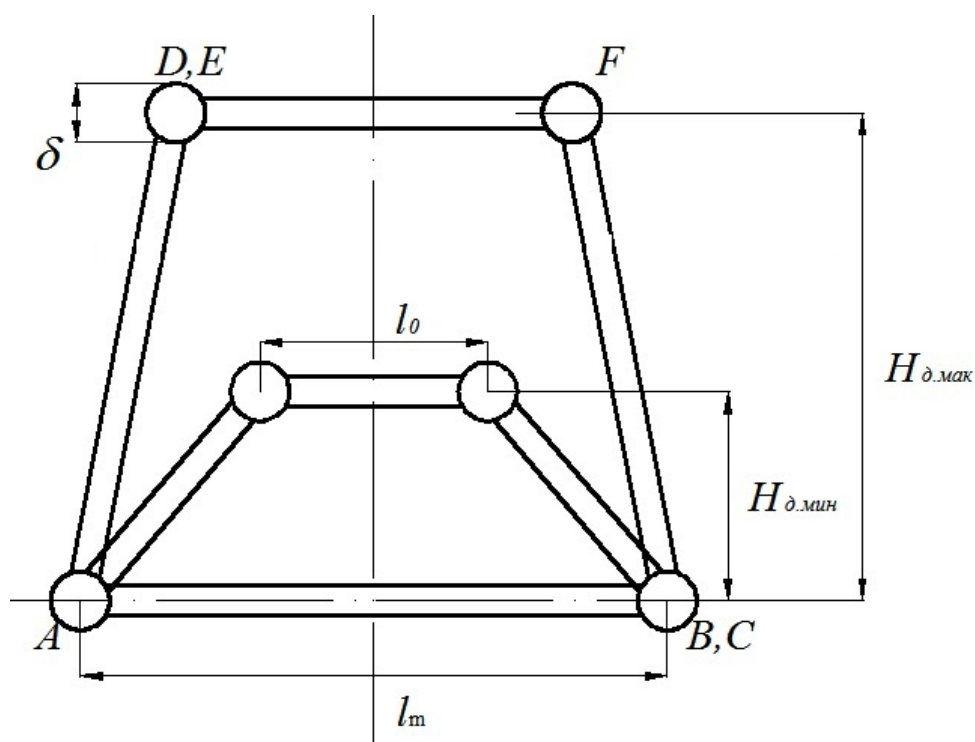


Рисунок 1 – Схема додекапода

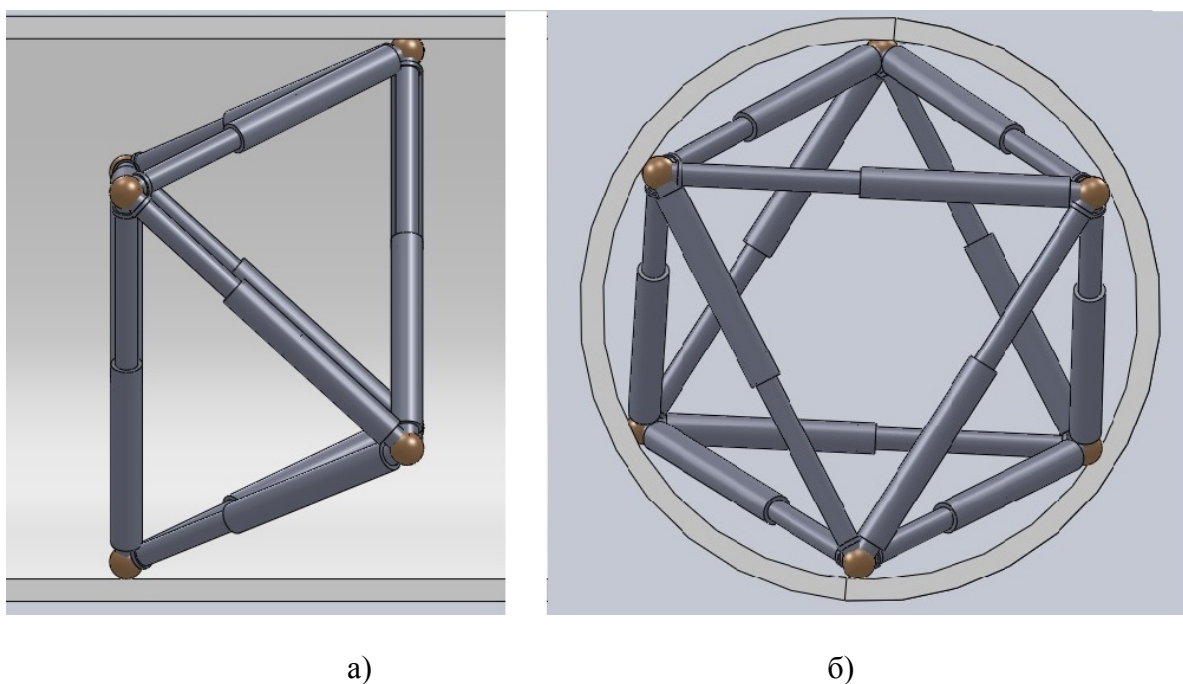


Рисунок 2 - Додекапод в цилиндрической трубе постоянного сечения: а) передний вид;
б) боковой вид

2. Алгоритм движения додекапода в прямолинейной трубе постоянного сечения

Пусть труба имеет внутренний диаметр D . Для того, чтобы в процессе движения додекапод прочно фиксировался в трубе, треугольники ABC , DEF должны быть

равносторонними и их плоскости должны быть перпендикулярны оси симметрии трубы (рисунок 3).

Из рисунка 3 имеем равенство

$$l_s = \frac{\sqrt{3}}{2}(D - \delta).$$

С учетом очевидного ограничения $l_0 < l_s < l_m$, из этого равенства получаем условие

$$\frac{2}{\sqrt{3}}l_0 \leq D - \delta \leq \frac{2}{\sqrt{3}}l_m. \quad (1)$$

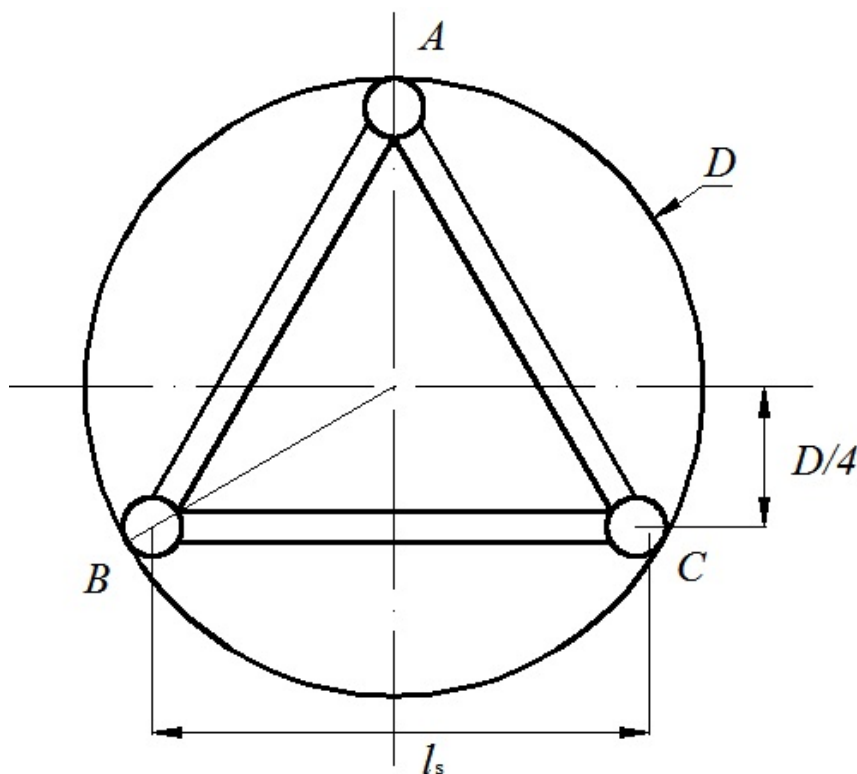


Рисунок 3 – К определению длин штанг додекапода

Алгоритм движения додекапода имеет следующий вид (рисунок 4).

1) Задаем начальные положения длин штанг и начальные положения шарниров:

$$l_{AB} = l_{BC} = l_{CA} = l_{DE} = l_{EF} = l_{DF} = l_s = \frac{\sqrt{3}}{2}D; \quad l_{AF} = l_{BF} = l_{BD} = l_{CD} = l_{CE} = l_{AE} = l_m.$$

2) Уменьшаем длины штанг AB, BC, CA со значения l_s до величины l_0 .

3) Аналогично уменьшаем длины штанг AD, AE, BD, BF, CE, CF с l_m до l_0 .

4) Увеличиваем длины штанг AB, BC, CA с l_0 до l_s .

5) Уменьшаем длины штанг DE, EF, DF с l_s до l_0 .

6) Увеличиваем длины штанг AD, AE, BD, BF, CE, CF с l_0 до l_m .

7) Увеличиваем длины штанг DE, EF, DF с l_0 до l_s . В результате додекапод перемещается вправо на шаг $h_s = H_{д.мак.} - H_{д.мин.}$.

8) Повторяем шаги 2-7 требуемое число раз.

Движение додекапода в прямолинейной трубе постоянного сечения иллюстрирует рисунок 4.

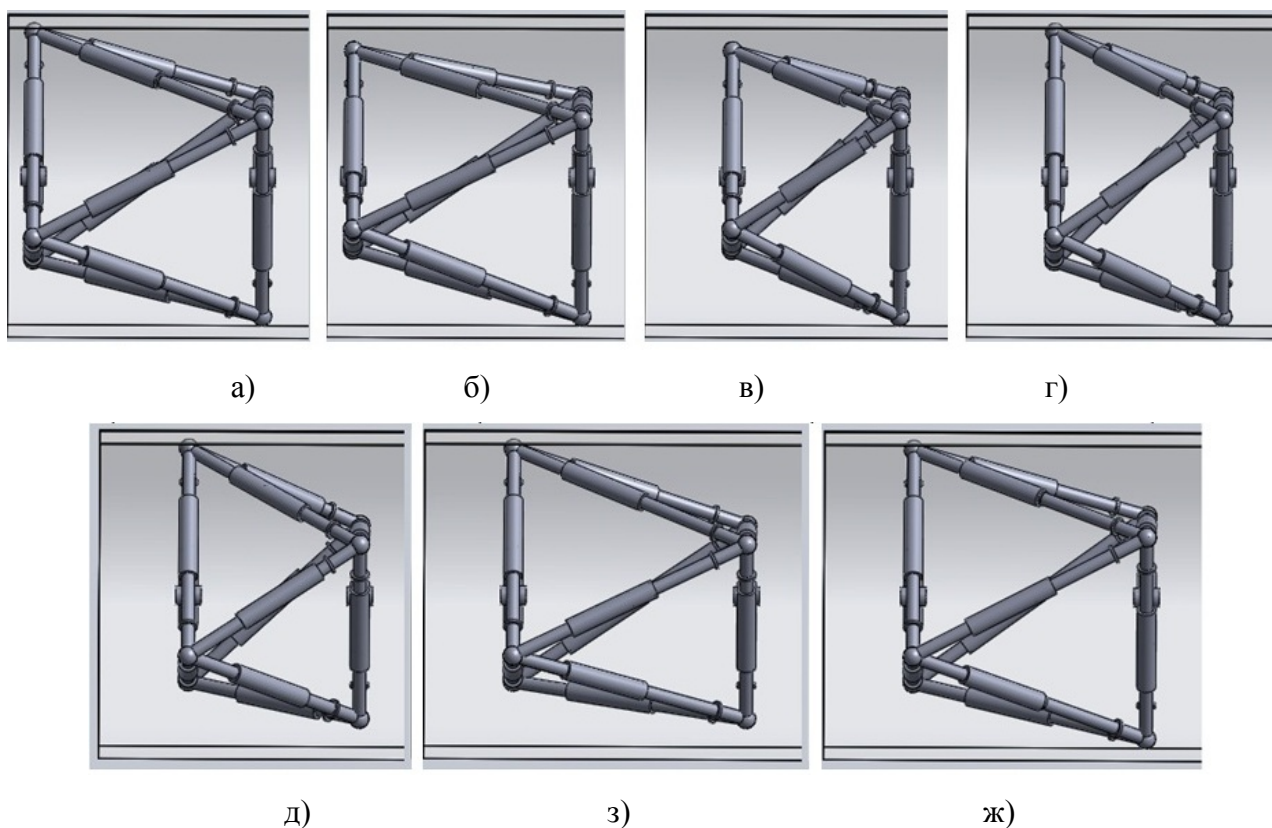


Рисунок 4 – Этапы движения додекапода в трубе постоянного сечения а) начальное состояние; б) – г) левая грань движется вперед; д) – ж) правая грань движется вперед

3. Алгоритм движения додекапода в прямолинейной трубе переменного сечения

Пусть цилиндрическая труба имеет две части постоянного сечения с диаметрами соответственно D (длина L_1) и d (длина L_2) и переход от первой части ко второй длиной Δ (рисунок 5).

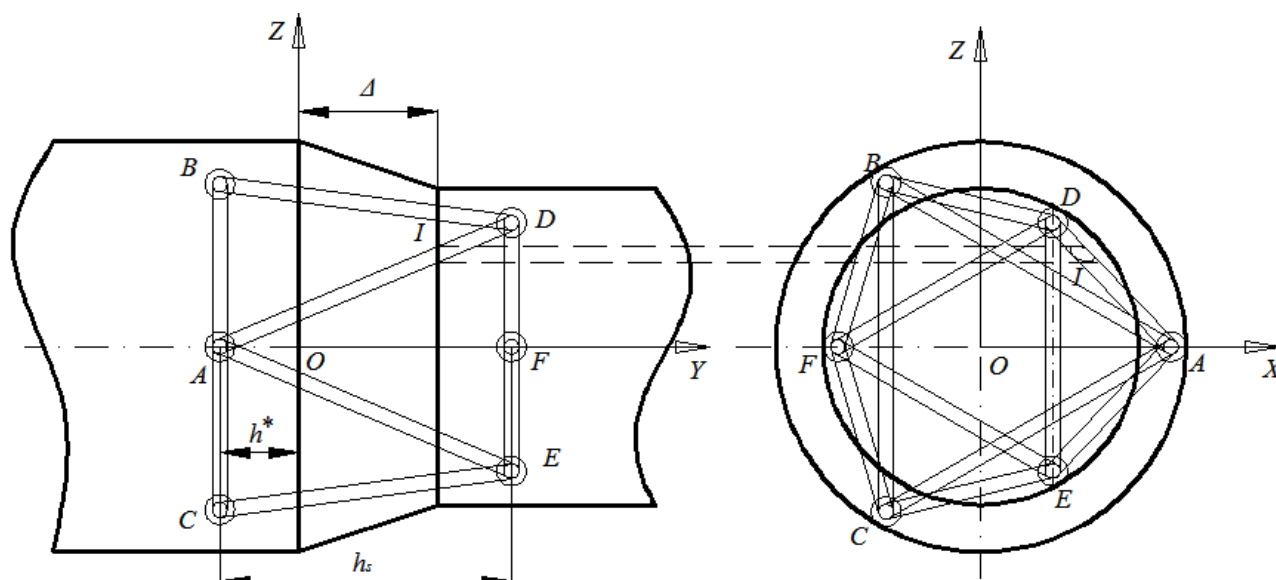
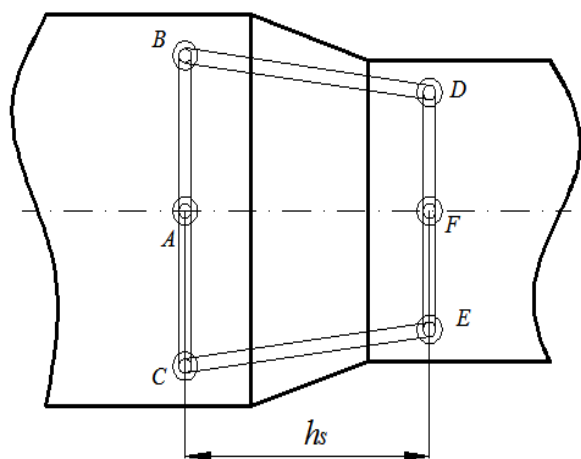


Рисунок 5 – Схема преодоления додекаподом перехода от трубы большего диаметра к трубе меньшего диаметра

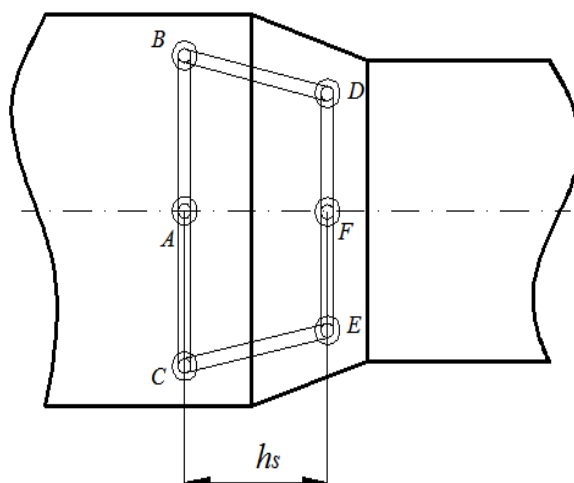
В данной ситуации существует опасность столкновения боковых штанг додекапода с поверхностью трубы в переходе. Легко видеть, что для того, чтобы избежать столкновения, необходимо, во-первых, выполнение следующих очевидных неравенств:

$$\frac{2}{\sqrt{3}}l_0 \leq d - \delta \leq \frac{2}{\sqrt{3}}l_m; \quad \frac{2}{\sqrt{3}}l_0 \leq D - \delta \leq \frac{2}{\sqrt{3}}l_m. \quad (2)$$

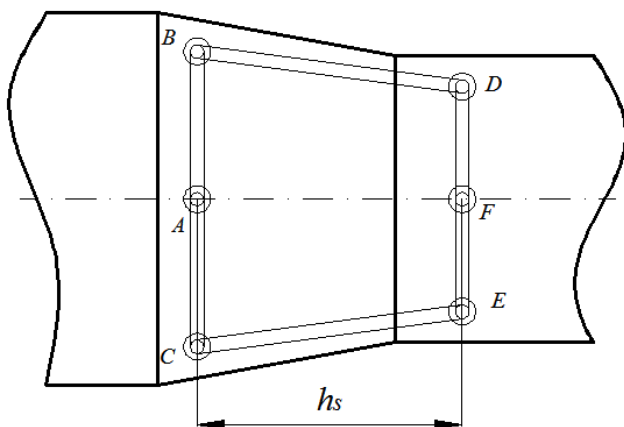
Во-вторых, для корректного преодоления додекаподом перехода имеют место ограничения на максимально допустимую длину шага додекапода $h_{s\max}$. Для определения этих ограничений рассмотрим два возможных положения додекапода на переходе (рисунок 6).



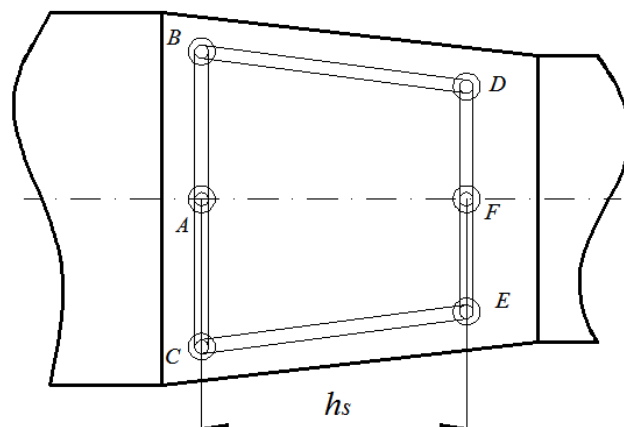
а)



б)



в)



г)

Рисунок 6 – Возможные положения додекапода на переходе трубы а) - б) - грань ABC находится в трубе большего диаметра; в) - г) – грань ABC находится внутри перехода

3.1. Случай 1. Грань ABC находится в первой части трубы (которая имеет диаметр D) – рисунок 7.

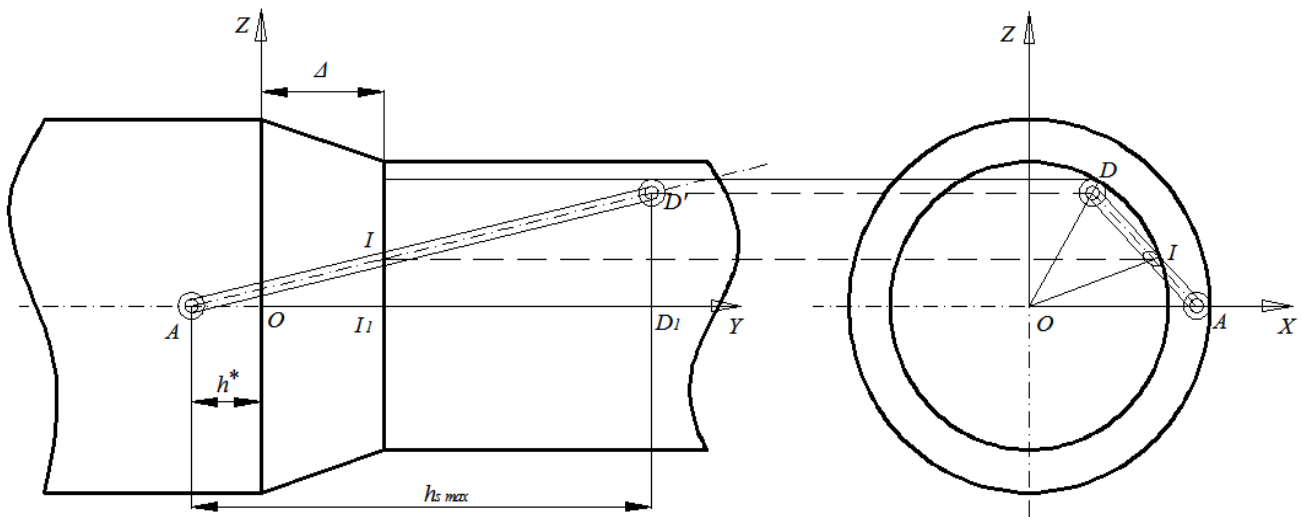


Рисунок 7 – К определению величины максимального шага додекапода: случай 1

Пусть начало $O(0,0,0)$ системы координат $OXYZ$ находится в центре трубы перед переходом. Легко видеть, что координаты шарнира A в этой системе координат равны $\left(\frac{D-\delta}{2}, -h^*, 0\right)$, а шарнира D - $\left(\frac{d-\delta}{4}, y_D, \frac{\sqrt{3}(d-\delta)}{4}\right)$. Величина h^* принимает свое минимальное значение в ситуации, когда шарнир A находится в начале перехода, то есть имеет место неравенство $h^* \geq 0$. Кроме того, из рисунка 7 имеем очевидное равенство $h_{s \max} = h^* + y_D$.

Максимальное допустимое значение $h_{s \max}$ шаг додекапода принимает, если боковая штанга AD касается правой границы перехода (когда диаметр перехода уже равен d). Эта точка касания на рисунке 7 обозначена I . Точка $I(x_I, y_I, z_I)$ находится на линии AD и расстояние ее до оси симметрии трубы равно $\frac{d-\delta}{2}$. Таким образом, имеет место система уравнений

$$\begin{cases} \frac{x_I - x_A}{x_D - x_A} = \frac{z_I - z_A}{z_D - z_A}, \\ x_I^2 + z_I^2 = \frac{(d-\delta)^2}{4}, \\ y_I = \Delta. \end{cases} \quad (3)$$

Решение системы уравнений (3) имеет вид

$$\begin{cases} x_I = az_I + b, \\ z_I = \frac{\sqrt{c} - ab}{a^2 + 1}, \\ y_I = \Delta, \end{cases}$$

где

$$a = \frac{d - 2D + \delta}{\sqrt{3}(d - \delta)}, \quad b = \frac{D - \delta}{2}, \quad c = a^2 b^2 - (a^2 + 1) \left(b^2 - \frac{(d - \delta)^2}{4} \right).$$

Из рисунка 7 следует справедливость отношения

$$\frac{|AI_1|}{|AD_1|} = \frac{|I_1 I|}{D_1 D},$$

где

$$|AI_1| = h^* + \Delta, \quad |AD_1| = h_{s\max}, \quad |I_1 I| = z_I, \quad |D_1 D| = z_D.$$

Отсюда следует выражение

$$h_{s\max} = \frac{z_D}{z_I} (h^* + \Delta) = \frac{\sqrt{3}(d - \delta)}{4z_I} (h^* + \Delta). \quad (4)$$

Как вытекает из формулы (4), свое максимальное значение величина $h_{s\max}$ принимает при $h^* = 0$.

Таким образом, имеем следующий алгоритм преодоления додекаподом перехода.

1) Если выполняется неравенство

$$|I_1 D_{1\max}| = h_{s\max} - \Delta \geq H_{\partial.\min}, \quad (5)$$

то грань ABC сразу переходит в правую часть трубы с шагом $h_s = h_{s\max} - H_{\partial.\min}$. Далее додекапод движется с постоянным шагом, равным $h_s = H_{\partial.\max} - H_{\partial.\min}$.

2) В случае не выполнения неравенства (5), грань ABC перемещается вперед с шагом $h_s = h_{s\max} - H_{\partial.\min}$.

3.2. Случай 2. Грань ABC находится внутри перехода (рисунок 8).

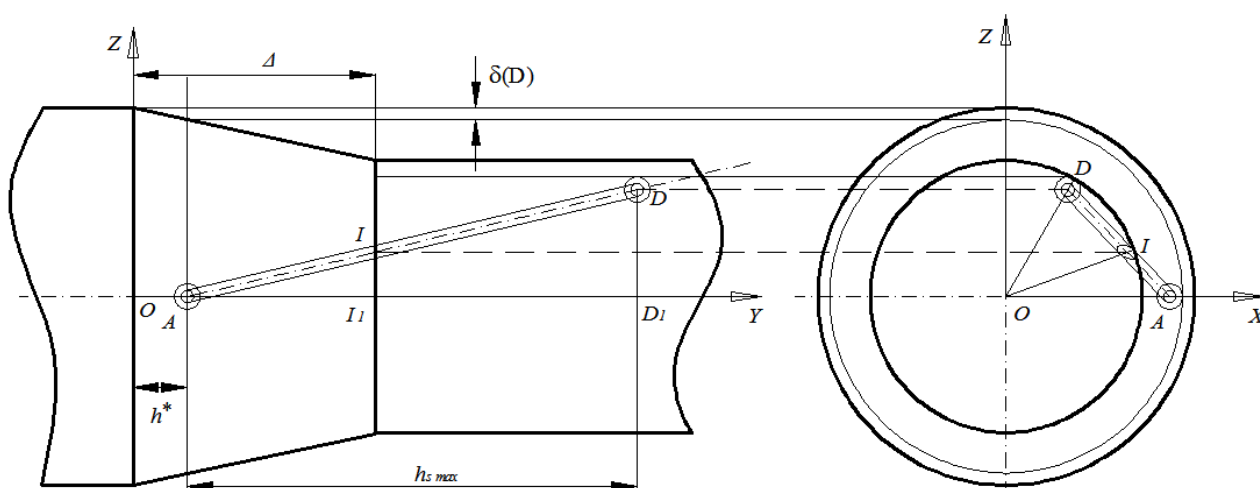


Рисунок 8 – К определению величины максимального шага додекапода: случай 2

В этом случае аналогично первому случаю координаты точек A , D равны соответственно

$$\left(\frac{D - \delta - \delta_D}{2}, h^*, 0 \right), \quad \left(\frac{d - \delta}{4}, y_D, \frac{\sqrt{3}(d - \delta)}{4} \right),$$

где

$$\delta_D = \frac{(D - d) h^*}{\Delta}, \quad \frac{\delta}{2} \leq h^* \leq \Delta - \frac{\delta}{2}.$$

Как и в случае 1, координаты x_I, y_I, z_I точки I получаем путем решения систему уравнения (3). Из рисунка 8 следует справедливость отношения $\frac{|AI_1|}{|AD_1|} = \frac{|I_1I|}{|D_1D|}$, где

$$|AI_1| = -h^* + \Delta, \quad |AD_1| = h_{s \max}, \quad |I_1I| = z_I, \quad |D_1D| = z_D.$$

Таким образом, в данном случае имеем следующее выражение для величины максимального шага додекапода:

$$h_{s \max} = \frac{z_D}{z_I} (-h^* + \Delta) = \frac{\sqrt{3}(d - \delta)}{4z_I} (-h^* + \Delta). \quad (6)$$

Вид функции $h_{s \max}(h^*)$ иллюстрирует рисунок 9, из которого следует, что максимальное значение величина $h_{s \max}$ принимает при $h^* \approx \frac{17}{20} \Delta$. Рисунок соответствует случаю $\delta = 10, \Delta = 100$.

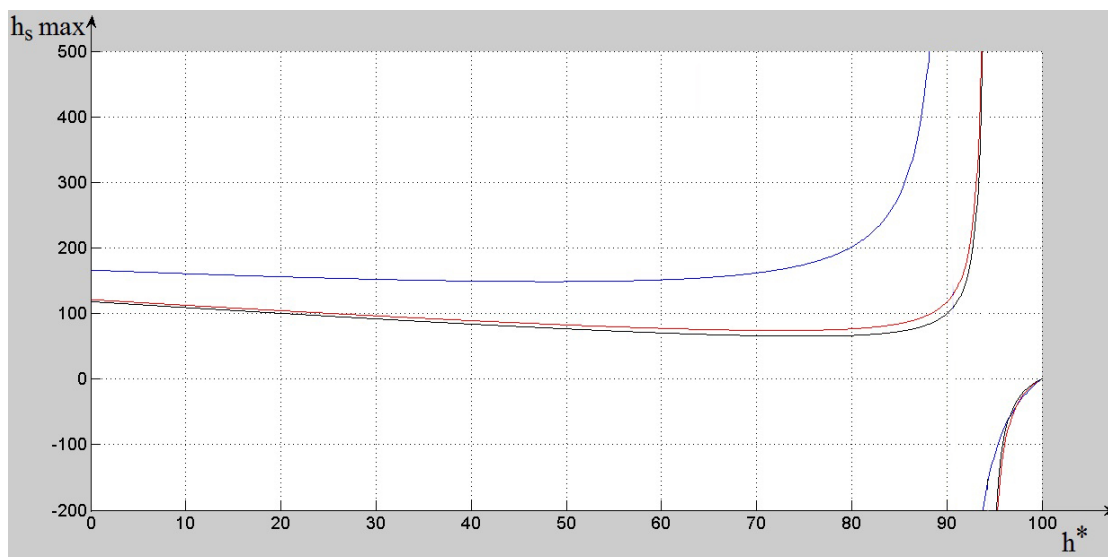


Рисунок 9 – Значения максимального шага додекапода $h_{s\max}$ в функции величины h^* : синяя линия - $D = 240$; $d = 160$; красная - $D = 250$; $d = 120$; черная – $D = 243$; $d = 100$

Алгоритм движения додекапода по переходу имеет в случае 2 следующий вид.

- 1) Додекапод движется вперед с шагом $h_s = h_{s\max} - H_{\partial.\min}$ до выполнения неравенства

$$|I_1 D_1| = h_{s\max} + h^* - \Delta \geq H_{\partial.\min}, \quad (7)$$

после чего грань ABC перемещается сразу в правую часть труба с шагом $h_s = h_{s\max} - H_{\partial.\min}$. Далее додекапод движется с постоянным шагом, равным $h_s = H_{\partial.\max} - H_{\partial.\min}$.

- 2) Если неравенство (7) не выполнено, то преодоление додекаподом перехода невозможно.

В качестве простого приближенного условия возможности преодоления додекаподом перехода может быть использовано условие

$$h_{s\max} \left(\frac{17}{20} \Delta \right) - \frac{3}{20} \Delta \geq H_{\partial.\min}. \quad (8)$$

3.3. Алгоритм преодоления додекаподом сужения трубы имеет следующий вид.

1) Додекапод перемещается по левой части трубы (имеющей диаметр D) с шагом $h_s = H_{\delta.мак.} - H_{\delta.мин.}$, который обеспечивает изменение длин боковых штанг в

диапазоне $\left(l_0, \frac{\sqrt{3} (D - \delta)}{2} \right)$.

2) Если условие (8) выполняется, то додекапод останавливается – преодоление перехода невозможно. В противном случае додекапод преодолевает переход, выбирая шаг своего перемещения по формуле (4) или формуле (6).

3) Додекапод продолжает двигаться по правой части трубы (имеющей диаметр d) с шагом $h_s = H_{\delta.мак.} - H_{\delta.мин.}$, который обеспечивает изменение длин боковых штанг в

диапазоне $\left(l_0, \frac{\sqrt{3} (d - \delta)}{2} \right)$.

Данный алгоритм иллюстрирует рисунок 10.

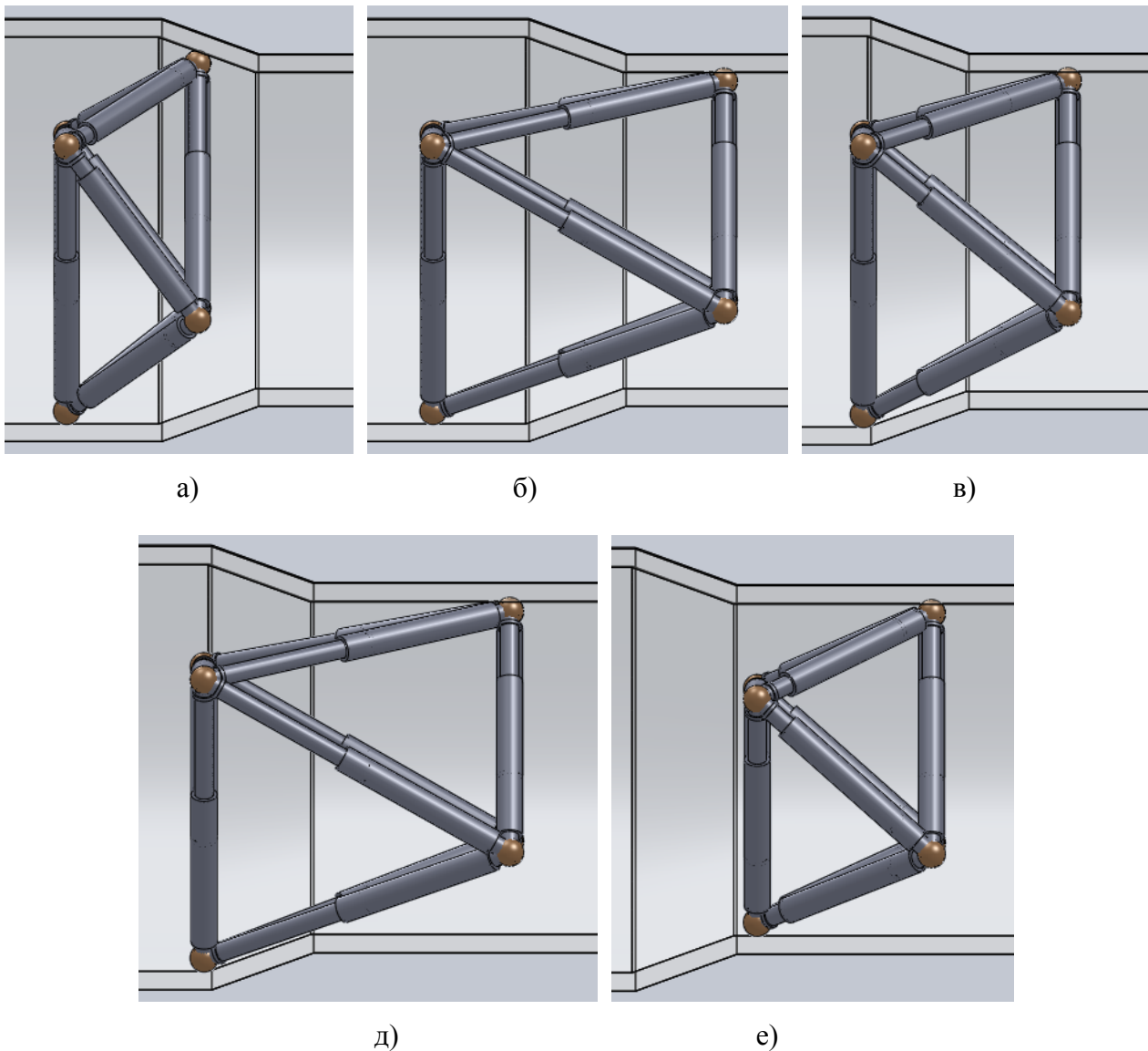


Рисунок 10 – Этапы преодоления додекаподов сужения цилиндрической трубы

Из характера зависимости $h_{s\max}(h^*)$ следует, что

- 1) если $\Delta < H_{\text{д.мин}}$ (переход узкий), то додекапод может преодолеть переход, не меняя шага движения,
- 2) если $d < \frac{D}{2}$, то $h_{s\max}$ имеет малое значение, то есть додекапод преодолевает переход с малым шагом.

Заключение

В работе получены условия преодоления додекаподом сужения цилиндрической трубы, а также алгоритмы движения додекапода в прямолинейной цилиндрической трубе переменного сечения. Полученные результаты относятся к ситуации, когда додекапод

переходит из трубы большего диаметра в трубу меньшего диаметра. Эти результаты легко переносятся на случай, когда додекапод преодолевает расширение трубы.

В развитие работы планируется разработка алгоритмов движения додекапода в непрямолинейных цилиндрических трубах, в таких же перекрещивающихся трубах, а также в не цилиндрических трубах (например, имеющих квадратное или эллиптическое сечение).

Список литературы

1. Merlet J.P. Parallel Robots. Kluwer Academic Publishers, 2000. P. 31-65.
2. Саяпин С.Н., Синев А.В. Адаптивный мобильный пространственный робот-манипулятор и способ организации движений и контроля физико-механических свойств и геометрической формы контактируемой поверхности и траектории перемещения с его помощью : пат. 2424893 РФ. 2011.
3. Саяпин С.Н. Додекапод как современный этап развития пространственных параллельных роботов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. № 6. С. 31-45.
4. Sayapin S.N. Parallel spatial robots of dodecapod type // [Journal of Machinery Manufacture and Reliability](#). November 2012. Vol. 41, iss. 6. P. 457-466. DOI: 10.3103/S1052618812060143
5. Данг С.Х. Кинематика односекционного параллельного манипулятора типа «додекапод» // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 2. DOI: [10.7463/0213.0539000](#)

Dodecapod's movement algorithm within a linear cylindrical tube of variable cross-section

08, August 2013

DOI: 10.7463/0813.0587740

Karpenko A.P., Dang S.H., Sayapin S.N.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation
Federal budget - funded research Institute of Machines Science named after A.A.Blagonravov
of the Russian Academy of Sciences

rk6bmstu@mail.ru

apkarpenko@mail.ru

s.sayapin@rambler.ru

A dodecapod is a one-section parallel manipulator which could be considered as an evolution of the wide-known hexapod, or the Stewart platform. The idea of a dodecapod was proposed by prof. S.N. Sayapin in 2012. In this article the authors consider one of the dodecapod's functional capabilities: movement within a linear cylindrical tube of uniform and variable cross-sections. A design model of the dodecapod was presented in this paper along with propagation conditions for dodecapod's movement within the tubes and the algorithms of changing the lengths of dodecapod's rods, which make its movement possible. The presented results allow to draw a conclusion that a one-sectional parallel manipulator based on a dodecapod could be applied to creation of mechanisms for execution of technological operations in linear cylindrical tubes of uniform and variable cross-sections.

Publications with keywords: [Dodecapod](#), [parallel manipulator](#), [cylindrical tube](#)

Publications with words: [Dodecapod](#), [parallel manipulator](#), [cylindrical tube](#)

References

1. Merlet J.P. *Parallel Robots*. Kluwer Academic Publishers, 2000, pp. 31-65.
2. Sayapin S.N., Sinev A.V. *Adaptivnyi mobil'nyi prostranstvennyi robot-manipuliator i sposob organizatsii dvizhenii i kontrolya fiziko-mekhanicheskikh svoystv i geometricheskoi formy kontaktiruemoi poverkhnosti i traektorii peremeshcheniia s ego pomoshch'iu* [Adaptive mobile spatial robot-manipulator and a way to organize movements and control of physical and mechanical properties and geometrical forms of contacting surface and the trajectory of the movement with its help]. Patent RF, no. 2424893, 2011.

3. Sayapin S.N. Dodekapod kak sovremennyy etap razvitiya prostranstvennykh parallel'nykh robotov [Dodecapod as a modern stage of development of spatial parallel robots]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2012, no. 6, pp. 31-45.
4. Sayapin S.N. Parallel spatial robots of dodecapod type. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, November 2012, vol. 41, iss. 6, pp. 457-466. DOI: 10.3103/S1052618812060143
5. Dang S.Kh. Kinematika odnosektsionnogo parallel'nogo manipulyatora tipa «dodekapod» [Kinematics of a single-section parallel «dodekapod» manipulator]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2013, no. 2. DOI: [10.7463/0213.0539000](https://doi.org/10.7463/0213.0539000)