

Ф. Ф. Хабибуллин, аспирант, **А. П. Мудров**, канд. техн. наук, доцент
Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А. Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ), Россия, г. Казань.
Тел./Факс: +7 (919)-632-68-96; E-mail: fanil_arask@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СИНТЕЗА ПРИВОДОВ ДЕЗИНТЕГРАТОРА НА БАЗЕ МЕХАНИЗМА БЕННЕТТА

В статье приведены результаты исследований методов синтеза модификаций механизма Беннетта по степени неравномерности вращения ведомого кривошипа, по положениям ведущего, ведомого звеньев и по закону движения ведомого звена. На основании полученных формул спроектированы графики, в которых представлены возможные значения длин и установочных углов звеньев для проектирования приводов дезинтегратора. Представлены рекомендации, полученные на основе анализа формул и графиков для проектирования модификаций механизма Беннетта.

Ключевые слова: механизм Беннетта, параллелограмм, антипараллелограмм, коэффициент неравномерности, синтез по закону движения.

F. F. Khabibullin, A. P. Mudrov

INVESTIGATIONS OF THE SYNTHESIS METHODS OF DISINTEGRATOR ACTUATORS ON THE BASIS OF THE BENNET MECHANISM

In this paper, the results of research on the methods for creating modifications of the Bennett mechanism on the degree of uneven rotation of the driven crank, according to the positions of the master, the driven links, and the law of motion of the link are given in the article. On the basis of the formula, graphs have been designed, in which the possible lengths and mounting angles of links for the design of drives of the des-integrator are presented. The presented recommendations were obtained on the basis of the analysis of formulas and graphs for the design of modifications of the Bennett mechanism.

Keywords: Bennett's mechanism, parallelogram, antiparallelogram, coefficient of unevenness, synthesis by motion law.

1. Введение

Развитие систем компьютерного моделирования дало возможность в несколько раз интенсифицировать развитие технологий и системы машиностроения. Использование программ 3D моделирования сыграло особую роль в развитии пространственных шарнирно-рычажных механизмов с особой структурой. Благодаря 3D моделирования были получены новые модификации механизмов, которые применены при проектировании инновационных устройств. Например, на основе модификаций механизма Беннетта за последние 5 лет получено более 20 патентов на изобретения и полезную модель [1-2].

На сегодняшний день при проектировании новых устройств основными векторами развития является совершенствование качества материала звеньев, применение композитных материалов, улучшение качества применяемых смазочных материалов шарнирных узлов. Однако синтез новых механизмов и их применение на производстве встречается значительно реже. Например, при производстве устройств смешивания, дробления, измельчения в конструкциях устройств используются обычные приводы: ременные, зубчатые и цепные, которые были введены в производство несколько веков назад.

В данной статье рассмотрим применение модификаций двух типов механизма Беннетта: параллелограмма и антипараллелограмма Беннетта (рис. 1) в приводах двухподвижного высокоэффективного дезинтегратора (рис. 2) [3].

© Хабибуллин Ф.Ф., Мудров А.П.; 2018 г.

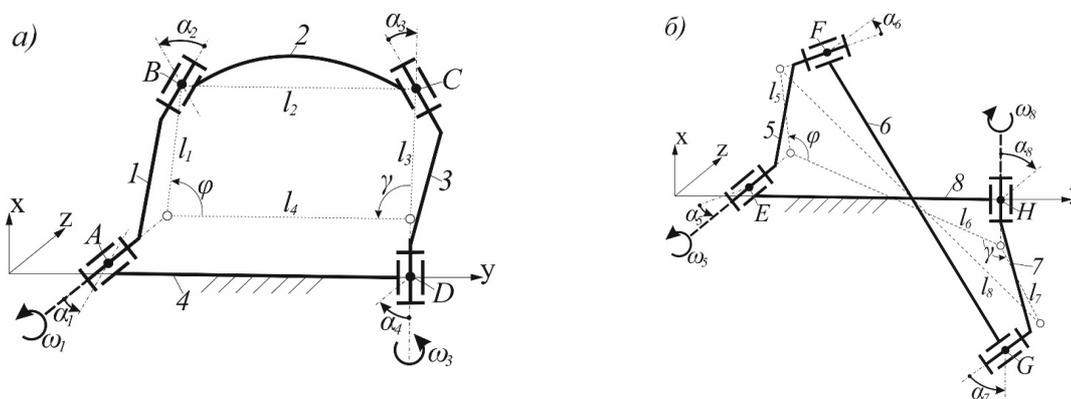


Рисунок 1. Замкнутые кинематические цепи:
 а - параллелограмма Беннетта, б - антипараллелограмма Беннетта.

где α_1, α_3 - углы скрещивание осей шарниров ведущего и ведомого кривошипа, α_2, α_4 - установочные углы станины и шатуна; l_1, l_2, l_3, l_4 - теоретические длины соответствующих звеньев.

В конструкции дезинтегратора параллелограмм Беннетта использован в качестве верхнего привода, который позволяет вращать ведомый кривошип (3) с переменной угловой скоростью при вращении ведущего кривошипа (1) с постоянной скоростью с помощью электродвигателя. В качестве нижнего привода дезинтегратора применен антипараллелограмм Беннетта, который позволяет вращать ведомый кривошип (7) с переменными угловыми скоростями при вращении ведущего кривошипа (5) с постоянной скоростью, работающего от того же электродвигателя (9). Как показывают результаты исследований [4-6], при одинаковых значениях длин звеньев и установочных углов звеньев степень неравномерности вращения ведомого кривошипа антипараллелограмма Беннетта выше по сравнению со степенью неравномерности антипараллелограмма Беннетта [7-10].

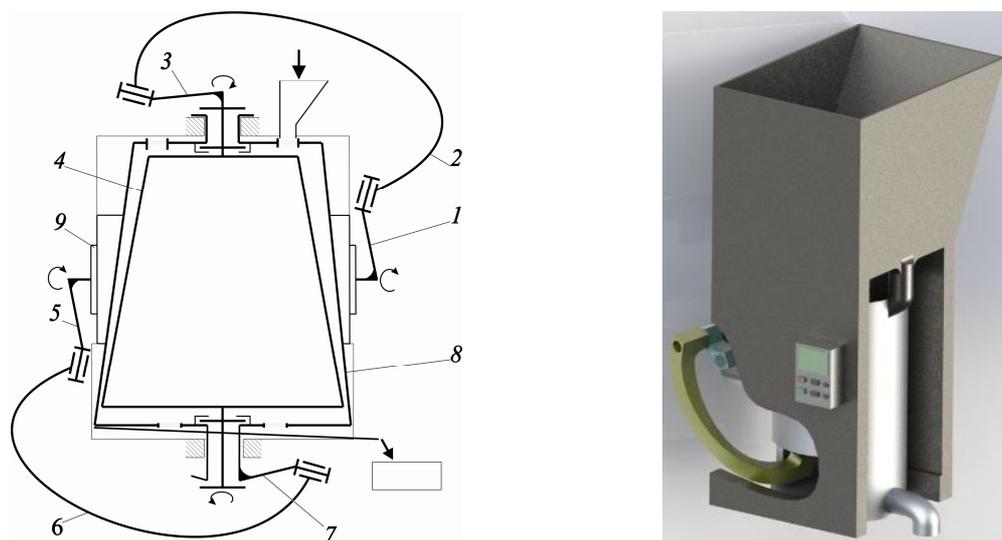


Рисунок 2. Структурная схема и фотография модели промышленного дезинтегратора с приводами на базе механизмов Беннетта.

Цель исследований – получить формулы для синтеза модификаций механизма Беннетта: по положениям ведущего и ведомого звеньев и по степени неравномерности вращения ведомого кривошипа, разработать рекомендации для усовершенствования использования механизма на практике.

2. Синтез по положениям ведущего и ведомого звеньев

Предположим, что необходимо спроектировать привод для существующего устройства дробления, в котором известно расстояние l_{ycm} . (расстояние между геометрическими осями вала рабочего органа до оси вала электродвигателя) и угол α_{ycm} . (угол пересечения этих осей). Конструктивные параметры станины (4) должны соответствовать параметрам устройства, получаем $l_4 = l_{ycm}$, $\alpha_4 = \alpha_{ycm}$. Положения ведущего (φ) и ведомого (γ) кривошипов определяются по требованиям технологии обработки материала при запуске. Учитывая, что $l_1/l_2 = \sin \alpha_1 / \sin \alpha_2$ при $l_1 = l_3, \alpha_1 = \alpha_3, l_2 = l_4, \alpha_2 = \alpha_4$, возникает необходимость определения параметров α_1 и l_1 . Значения установочного угла ведущего кривошипа α_1 найдем составив уравнение взвешенной разности:

$$\Delta_q = q\Delta, \tag{1}$$

где: Δ_q - отклонение от заданной функции, выраженное функционально,
 $q\Delta$ - непрерывная весовая функция аргумента и параметров приближающей функции Δ .

$$\Delta_q = (X_B - X_C)^2 + (Y_B - Y_C)^2 + (Z_B - Z_C)^2 - l_2^2 = 0, \tag{2}$$

Принимая во внимание, что

$$\begin{aligned} X_B &= AB \cdot K_{X_{AD}^A}^{Y_{AB}^A} = -l_1 \sin \varphi \\ Y_B &= AB \cdot K_{Y_{AD}^A}^{Y_{AB}^A} = l_1 \cos \varphi, \end{aligned} \tag{3}$$

$$Z_B = AB \cdot K_{Z_{AD}^A}^{Y_{AB}^A} = 0$$

$$\begin{aligned} X_C &= X_{AD} \cdot K_{X_{AD}^A}^{Y_{AD}^D} + X_{DC} \cdot K_{X_{AD}^D}^{Y_{BC}^D} = -l_1 \cos \alpha_2 \sin \gamma \\ Y_C &= Y_{AD} \cdot K_{Y_{AD}^A}^{Y_{AD}^D} + Y_{DC} \cdot K_{Y_{AD}^D}^{Y_{BC}^D} = l_2 + l_1 \cos \gamma \end{aligned} \tag{4}$$

$$Z_C = Z_{AD} \cdot K_{Z_{AD}^A}^{Y_{AD}^D} + Z_{DC} \cdot K_{Z_{AD}^D}^{Y_{BC}^D} = -l_1 \sin \alpha_2 \sin \gamma$$

где $K_{X_{AD}^A}^{Y_{AB}^A}$ - направляющие косинусы между осями X_{AD}^A и Y_{AB}^A .

Подставляем (3) и (4) в уравнение (2), получаем

$$\Delta_q = ((-l_1 \sin \varphi) + (l_1 \cos \alpha_2 \sin \gamma))^2 + ((l_1 \cos \varphi) - (l_2 + l_1 \cos \gamma))^2 + (l_1 \sin \alpha_2 \sin \gamma)^2 - l_2^2 = 0. \quad (5)$$

Решаем уравнение относительно l_1/l_2 :

$$\frac{l_1}{l_2} (1 - 2 \sin \varphi \cos \alpha_2 \sin \gamma + \cos \alpha_2^2 \sin \gamma^2 - 2 \cos \varphi \cos \gamma + \cos \gamma^2 + \sin \alpha_2^2 \sin \gamma^2) = (2 \cos \varphi - 2 \cos \gamma), \quad (6)$$

после преобразований получаем:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} (1 - \sin \varphi \cos \alpha_2 \sin \gamma - \cos \varphi \cos \gamma) = \cos \varphi - \cos \gamma, \quad (7)$$

откуда имеем:

$$\alpha_1 = \arcsin \frac{(\cos \varphi + \cos \gamma) \cdot \sin \alpha_2}{1 - \sin \varphi \cos \alpha_2 \sin \gamma - \cos \varphi \cos \gamma}. \quad (8)$$

На основании полученного уравнения (8), позволяющего синтезировать модификации механизма Беннетта по положениям ведущего и ведомого кривошипов, получены графики. На рисунке 3а представлен график возможных значений α_1, α_2 при $\varphi = 15^\circ, \gamma_1 = 16^\circ, \gamma_2 = 30^\circ, \gamma_3 = 120^\circ, \gamma_4 = 180^\circ, \gamma_5 = 344^\circ$, на рисунке 3б представлен график возможных значений α_1, α_2 при $\gamma = 15^\circ, \varphi_1 = 16^\circ, \varphi_2 = 30^\circ, \varphi_3 = 120^\circ, \varphi_4 = 180^\circ, \varphi_5 = 344^\circ$.

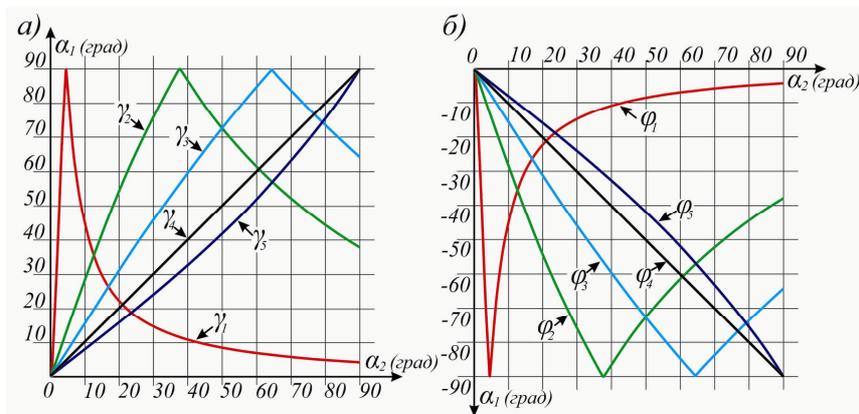


Рисунок 3. График возможных значений α_1, α_2
 а) при $\varphi = 15^\circ, \gamma = 16^\circ \dots 344^\circ$; б) при $\gamma = 15^\circ, \varphi = 16^\circ \dots 344^\circ$.

Анализ графика показывает, что сближение значений начальных положений ведущего φ и ведомого γ кривошипов приводит к увеличению разницы значений установочных углов ведущего кривошипа α_1 (ведомого кривошипа α_3) и шатуна α_2 (станины α_4). Таким образом, при условии $\varphi > \gamma$ и при $\varphi + \gamma > 360^\circ$ значение установочного угла ведущего кривошипа α_1 принимает положительное значение. Из графика видно, что при $\alpha_1 = 90^\circ$ установочный угол второго звена α_2 принимает некоторое

значение (например, при $\varphi = 30^0, \alpha_1 = 90^0$, следовательно, $\alpha_2 = 37,66^0$), после которого график начинает снижаться, когда $\alpha_2 = 90^0$, то α_1 принимает аналогичное значение ($\alpha_2 = 37,66^0$).

3. Синтез по степени неравномерности вращения ведомого кривошипа

Рассмотрим случай, при котором необходимо спроектировать привод для существующего устройства дробления с заданной степенью неравномерности δ , где заданы кратчайшие расстояние между геометрическими осями валов электродвигателя и рабочих органов ($l_{уст.}$) и угол пересечения этих осей ($\alpha_{устр.}$). Конструктивные параметры станины (4) должны соответствовать параметрам устройства, получаем $l_4 = l_{уст.}, \alpha_4 = \alpha_{устр.}$. Учитывая условия собираемости механизма ($l_1 = l_3, \alpha_1 = \alpha_3, l_2 = l_4, \alpha_2 = \alpha_4$), необходимо найти параметры α_1 и l_1 [11, 12]. Для этого воспользуемся формулой:

$$\delta = \pm 2 \frac{\sin \alpha_1 \sin \alpha_2}{\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1} \tag{9}$$

После возведения уравнение (9) в квадрат и нескольких преобразований, будем иметь:

$$\cos \alpha_1 = \frac{\delta^2 \cos \alpha_2 \pm 2\sqrt{\delta^2 \sin^2 \alpha_2 + 4 \sin^4 \alpha_2 - \sin^2 \alpha_2 \delta^2 \cos^2 \alpha_2}}{\delta^2 + 4 \sin^2 \alpha_2} \tag{10}$$

Для удобства расчетов упрощаем уравнение (10), получаем:

$$\cos \alpha_1 = \frac{\delta^2 \cos \alpha_2 \pm 2 \cdot \sin^2 \alpha_2 \sqrt{4 + \delta^2}}{\delta^2 + 4 \sin^2 \alpha_2} \tag{11}$$

На основании полученного уравнения (11) были построены графики возможных значений α_1, α_2 при $\delta = 0,5; \delta = 1; \delta = 2; \delta = 3$ для параллелограмма Беннетта (рис. 4) и антипараллелограмма Беннетта (рис. 5).

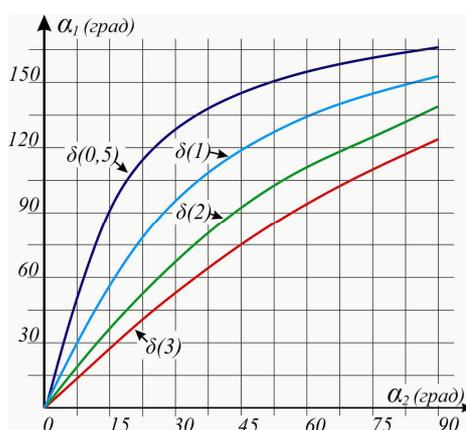


Рисунок 4. График возможных значений α_1, α_2 при $\delta = 0,5 \dots 3$ для параллелограмма Беннетта.

Анализ графика показывает, что при синтезе параллелограмма Беннетта по степени неравномерности вращения ведомого кривошипа необходимо учитывать, что значе-

ние установочного угла первого (третьего) звена будет сравнительно больше по сравнению с установочным углом второго (четвертого) звена.

При анализе графиков можно определить оптимальные установочные углы кривошипов по требуемым величинам коэффициентов неравномерности вращения. Можно сказать, что наибольшую неравномерность для случая $\delta = 3$ можно добиться при условии $\alpha_1 = \alpha_2 + 15 \dots 30^\circ$.

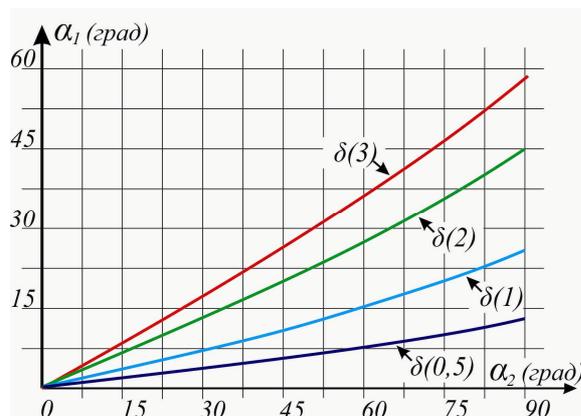


Рисунок 5. График возможных значений α_1, α_2 при $\delta = 0,5 \dots 3$ для антипараллелограмма Беннетта.

Из графика видно, что при синтезе антипараллелограмма Беннетта по степени неравномерности необходимо учитывать, что значение установочного угла второго звена будет сравнительно больше по сравнению с установочным углом первого звена.

5. Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили получить формулы для синтеза модификаций механизма Беннетта по степени неравномерности вращения ведомого кривошипа, по положениям ведущего, ведомого звеньев и по закону движения ведомого звена. На основании полученных формул (7) и (10) спроектированы графики, которые показывают возможность существования работоспособных модификаций механизма Беннетта и которые можно использовать при проектировании новых устройств. При анализе данных графиков нами получены следующие закономерности:

- при увеличении значений установочных углов α_1 (α_3) и α_2 (α_4) до 90° и при их сближении степень неравномерности вращения ведомого кривошипа возрастает.

- при одинаковых параметрах установочных углов звеньев ($\alpha_1 = 45^\circ, \alpha_2 = 30^\circ$) степень неравномерности у антипараллелограмма ($\delta = 2,224$) будет выше по сравнению с параллелограммом ($\delta = 0,224$).

- при α_2 (α_4) = 90° степень неравномерности вращения ведомых кривошипов параллелограмма и антипараллелограмма будет одинакова.

Использование данных закономерностей позволяет конструкторам расширить диапазон возможностей использования модификаций механизма Беннетта на производстве.

Исследования проведены при поддержке Инвестиционно-венчурного фонда Республики Татарстан на основании договора целевого финансирования №13/42/2018 от 12.03.2018г

ЛИТЕРАТУРА

1. Мудров, А. Г. Обзор исследований пространственных механизмов с вращательными шарнирами / А. Г. Мудров, Р. Ш. Марданов // Теория механизмов и машин. – 2015. – Т. 13. – № 26. – С. 62-74.
2. Иоффе, М. Л. О выборе параметров механизма Беннетта и моделировании его в MATLAB / Л. О. Иоффе // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2016. – № 2 (671). – С. 11-19.
3. Яруллин, М. Г. Геометрия кинематической цепи и звеньев механизма Беннетта / М. Г. Яруллин, Ф. Ф. Хабибуллин // Современное машиностроение: Наука и образование: Материалы 6-й Междунар. науч.-практ. конференции. Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – С. 262-274.
4. Мудров, А. Г. Исследование динамических характеристик пространственного четырехзвенника / А. Г. Мудров, Р. Л. Сахапов, Д. И. Шамилов // Техника и технология транспорта. – 2017. – № 4 (5). – С. 1-7.
5. Yarullin, M. G. Theoretical and Practical Conditions of Bennett Mechanism Workability / M. G. Yarullin, F. F. Khabibullin // Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer International Publishing AG 2017, pp. 145-153.
6. Яруллин, М. Г. Синтез сферических четырехзвенников с вращательными парами в программе SOLIDWORKS / М. Г. Яруллин, М. Р. Фаизов / Современное машиностроение: Наука и образование: Материалы 6-й Междунар. науч.-практ. конференции. Под ред. М. М. Радкевича и А. Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – № 6. – С. 250-261.
7. Бородин, В. М. Шестизвенный механизм как топологический феномен симметрии Мебиуса / В. М. Бородин, А. Д. Лустин, Л. Ш. Хаиров, А. В. Щербаков // Труды Академэнерго. – 2017. – № 3. – С. 79-87.
8. Яруллин, М. Г. Структурное исследование двухподвижного пятизвенного пространственного механизма со сдвоенным кривошипом / М. Г. Яруллин, И. Р. Исянов / Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 6-й международной научно-практической конференции. Под ред. А.Н.Евграфова и А.А. Поповича.- СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – С. 239-249.
9. Евграфов, А. Н. Компьютерное моделирование механизмов / А. Н. Евграфов, Г. Н. Петров / Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 5-й Междунар. науч.-практ. конференции. Под ред. А. Н. Евграфова и А. А. Поповича. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 203-215.
10. Haibo Qu, Yuefa Fang, Sheng Guo. Bennett motion analysis based on specific regulus // Int. J. of Mechanisms and Robotic Systems, 2013. – Vol.1. – No.2/3 – pp.170 – 184.
11. Мудров, П. Г. Пространственные механизмы с вращательными парами / П. Г. Мудров. – Казань: Изд-во Казанского университета, 1976. – 264 с.
12. Зиганшин, И. И. Функции механизма Беннетта / И. И. Зиганшин, А. Г. Мудров / Техника и технология транспорта: научный Интернет-журнал. – 2017. – № 2 (3). – С. 1-4.
13. Яруллин, М. Г. Структурное исследование двухподвижного пятизвенного пространственного механизма со сдвоенным кривошипом / М. Г. Яруллин, И. Р. Исянов / Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 6-й международной научно-практической конференции. Под ред. А. Н. Евграфова и А. А. Поповича. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – С. 239-249.

Поступила в редколлегию 30.04.2018 г.