

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 681.7.023.72

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-197-204>

Поступила в редакцию 21.12.2018

Received 21.12.2018

А. С. Козерук¹, Р. О. Диас Гонсалес^{1,2}, М. И. Филонова¹, В. О. Кузнецик¹, Е. Н. Варопай¹¹*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*²*Университетский политехнический институт Сантьяго Мариньо, Мериды, Венесуэла***КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СПОСОБА, ПОВЫШАЮЩЕГО ТОЧНОСТЬ
ОБРАБОТКИ КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Аннотация. Предложен способ получения высокоточных конических поверхностей в условиях свободного притирания, позволяющий регулировать параметры процесса обработки конической детали в зависимости от распределения подлежащего удалению припуска с ее поверхности. Приведена схема реализации способа, в которой основными звеньями являются инструмент с плоской рабочей поверхностью и правильник в виде стеклянной пластины, предназначенный для поддержания необходимой точности обрабатываемой поверхности инструмента. Для разработки методики управления срабатыванием рабочей поверхности инструмента с целью обеспечения необходимой точности ее плоскостности выполнен анализ закономерностей движения звеньев исполнительного механизма базового станка, на котором устанавливается предлагаемое устройство для обработки конических деталей. Рассмотрена структура исполнительного механизма рычажного станка, установлена связь между обобщенной координатой и положениями звеньев этого механизма в процессе обработки с учетом возвратно-вращательного движения деталей относительно инструмента в условиях свободного притирания, исследовано положение рычага и верхнего звена в вертикальной плоскости, рассмотрены геометрические параметры колебательного перемещения верхнего звена. Получено соотношение для расчета длины кривошипа исполнительного механизма станка в зависимости от амплитуды переносного движения его выходного звена. Установлена аналитическая связь между входным и выходным звеньями исполнительного механизма станка, что дает возможность рассчитать длину первого из отмеченных звеньев в зависимости от требуемой величины амплитуды колебательного движения второго из них и создает предпосылки для разработки инженерных методов управления процессом формообразования высокоточных конических поверхностей в условиях свободного притирания.

Ключевые слова: коническая поверхность, свободное притирание, сепаратор, рычажный станок, исполнительный механизм, входное и выходное звенья, наладочные параметры

Для цитирования: Кинематический анализ способа, повышающего точность обработки конических поверхностей / А. С. Козерук [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №2. – С. 197–204. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-197-204>

**Albin S. Kozeluk¹, Rafael' Orlandos Dias Gonsales^{1,2}, Marina I. Filonova¹, Valeria O. Kuznechik¹,
Evgeny N. Varopay¹**¹*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*²*University Polytechnic Institute of Santiago Marino, Merida, Venezuela***KINEMATIC ANALYSIS OF THE METHOD INCREASING THE ACCURACY OF TREATMENT OF CONIC
SURFACES**

Abstract. A method for processing high-precision conical surfaces under conditions of free grinding on a lever machine is proposed, which allows adjusting the process parameters taking into account the technological heredity of the workpiece from the point of view of the distribution pattern of the allowance to be removed from its surface. The scheme of implementation of the method in which the main links are a tool in the form of a faceplate and a separator for maintaining the required accuracy of its flatness. In order to develop a method of targeted control of the actuation of the working surface of the tool to maintain the required accuracy of its flatness, mathematical modeling of the motion patterns of the links of the actuator of the base machine, on which the proposed device for processing conical parts is installed, was performed. In the process of mathematical simulation structural analysis of the executive mechanism of the lever machine is carried out, connection between the generalized coordinate and provisions of links of the executive mechanism of the lever machine is established, position of the lever and the upper link in the vertical plane is probed, geometrical parameters of reflexive rotational motion of the upper link are considered, the ratio for calculation of length of a crank of the executive mechanism of the machine depending on amplitude of figurative movement of its output link is obtained. An analytical relationship has been established between the input and output links of the machine actuator, which makes it possible to calculate the length of the first of the marked links depending on the required amplitude of the oscillatory motion of the second of them and creates the prerequisites for the development of engineering methods for controlling the process of forming high-precision conical surfaces under conditions of free grinding.

Keywords: conical surface, free rubbing, separator, lever machine, actuating mechanism, input and output links, adjustment parameters

For citation: Kozेरuk A. S., Dias Gonsales R. O., Filonova M. I., Kuznechik V. O., Varopay E. N. Kinematic analysis of the method increasing the accuracy of treatment of conic surfaces. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 2, pp. 197–204 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-197-204>

Введение. При обработке конических поверхностей в машиностроении используют в основном методы обработки в условиях геометрического замыкания на токарных станках (патент 2131325 РФ, МПК В 23В 5/38 «Способ обработки конических поверхностей вращения», авторы – В. В. Лоцманенко, М. В. Лоцманенко; патент 2016704 РФ, МПК В 23В 5/38 «Станок для обработки конических сопрягаемых поверхностей», авторы – А. М. Мелай [и др.]; патент 2071395 РФ, МПК В 23С 3/04 «Способ обработки конической поверхности детали», авторы – И. А. Марченко, Ю. Н. Зорин, В. В. Щенев) или с применением специальных приспособлений (патент 2065801 РФ, МПК В 23В 41/06 «Устройство для обработки конических поверхностей», авторы – Н. К. Гришко [и др.]). Такая технология ввиду наличия вибрации в технологическом оборудовании не позволяет получить конические поверхности с высокой степенью точности ее образующей (прямолинейности и правильной геометрической формы поперечного сечения по всей высоте конуса с погрешностью не более $\pm 0,25$ мкм [1, 2]). Упомянутых недостатков можно избежать, если использовать метод свободного притирания, в котором контакт инструмента и заготовки обеспечивается их силовым замыканием, причем одна из притирающихся поверхностей в процессе обработки непрерывно самоустанавливается на другой [3]. Согласно этому методу применяют инструмент с плоской рабочей поверхностью, а заготовке сообщают вращение вокруг ее оси симметрии и сложное переносное движение, состоящее из вращательного вокруг оси симметрии инструмента и возвратно-вращательное в направлении, перпендикулярном данной оси, при этом обработку ведут путем регулирования скоростей вращения инструмента, переносного движения заготовки и амплитуды этого движения (патент 17104 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/00 «Устройство для обработки деталей с коническими поверхностями», авторы – А. С. Козерук [и др.]; патент 21163 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/02 «Устройство для групповой обработки деталей с коническими поверхностями», авторы – А. С. Козерук [и др.]).

Недостатком технологии обработки конических поверхностей по методу свободного притирания (другого метода обработки конической поверхности оптических деталей в открытом доступе не выявлено) является непостоянство скорости вращения заготовки вокруг собственной оси симметрии, поскольку эта скорость обусловлена наличием между обрабатываемой поверхностью и рабочей поверхностью инструмента сил трения, которые носят нестабильный характер из-за неравномерного распределения обрабатываемой абразивной суспензии [4].

Отмеченное устраняется, если образующую конуса расположить в контактирующей с инструментом плоскости сепаратора, регулированием относительной и переносной скоростей которого по инструменту поддерживают необходимую плоскостность его рабочей поверхности. С целью разработки приемов инженерного управления упомянутыми скоростями требуется выполнить математическое моделирование технологического оборудования для обработки конических поверхностей, чему и посвящена настоящая работа.

Схема обработки. Схема реализации обработки конических поверхностей по методу свободного притирания приведена на рис. 1. Здесь на инструменте 1 расположен сепаратор 2, в отверстие А которого помещена конусообразная заготовка 3. Сепаратор закреплен на клеичном инструменте 4, шарнирно соединенном с поводком 5 выходного звена исполнительного механизма базового станка. При этом инструмент, заготовка и сепаратор установлены с возможностью регулируемого вращения со скоростями $\omega_{и}$, ω_3 и $\omega_с$ соответственно, причем сепаратор в процессе обработки совершает также возвратно-вращательное движение со скоростью $\omega_{в-в}$.

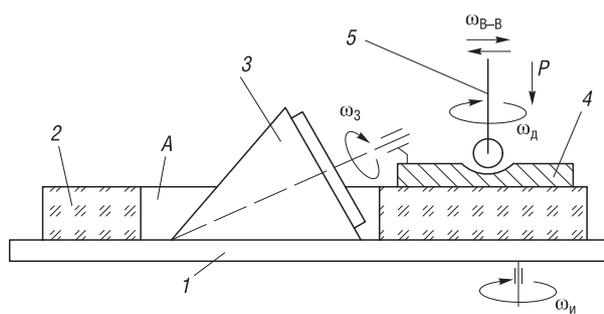


Рис. 1. Схема обработки конической детали
Fig. 1. Processing scheme of the conical parts

но притирания приведена на рис. 1. Здесь на инструменте 1 расположен сепаратор 2, в отверстие А которого помещена конусообразная заготовка 3. Сепаратор закреплен на клеичном инструменте 4, шарнирно соединенном с поводком 5 выходного звена исполнительного механизма базового станка. При этом инструмент, заготовка и сепаратор установлены с возможностью регулируемого вращения со скоростями $\omega_{и}$, ω_3 и $\omega_с$ соответственно, причем сепаратор в процессе обработки совершает также возвратно-вращательное движение со скоростью $\omega_{в-в}$.

Предлагаемая схема обработки конических поверхностей может быть реализована на серийном рычажном станке [5]. Для управления процессом обработки на этом технологическом оборудовании, при котором обеспечивается равномерное срабатывание рабочей поверхности инструмента, непосредственно влияющей на прямолинейность образующей конуса, выполним структурный анализ исполнительного механизма рычажного станка, кинематическая схема которого представлена на рис. 2.

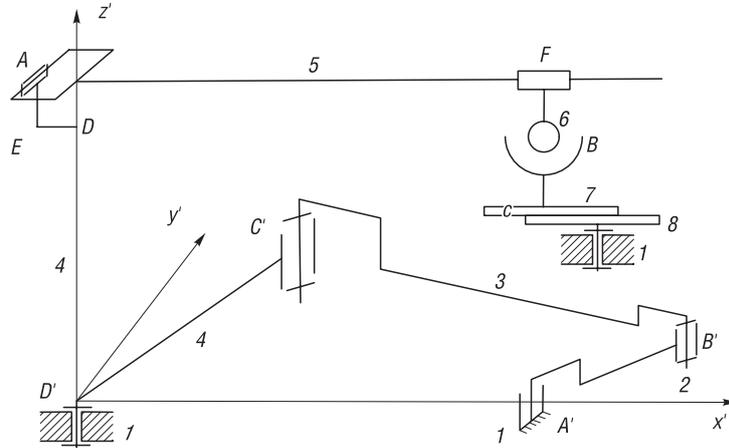


Рис. 2. Кинематическая схема исполнительного механизма рычажного станка
 Fig. 2. Kinematic diagram of the actuating mechanism of the lever machine

Звенья 2 и 3 этого механизма расположены в плоскости $D'x'y'$, а звенья 4, 5 и 6 – в плоскости, перпендикулярной $D'x'y'$. Звено 2 с неподвижным звеном 1, а также звенья 2 и 3, 3 и 4, 4 и 1, 4 и 5, 8 и 1 образуют вращательные кинематические пары, звенья 5 и 6 – поступательную пару. Верхнее звено 7 составляет сферическую пару со звеном 6 и плоскую с нижним звеном 8. При этом звенья 1, 2, 3, 4 образуют шарнирный четырехзвенник [6].

Механизм шарнирного четырехзвенника работает следующим образом. Вращательное движение кривошипа 2 через шатун 3 преобразуется в возвратно-вращательное движение звена 4 и рычага 5. Последний через поводок 6 вызывает возвратно-вращательное перемещение верхнего звена 7 относительно нижнего 8.

Связь между обобщенной координатой и положениями звеньев исполнительного механизма рычажного станка. Поскольку звенья 4, 5 и 6 в процессе обработки плоских поверхностей не изменяют своего положения относительно друг друга и их можно рассматривать как одно звено, то для описания движения исполнительного механизма станка достаточно исследовать движение шарнирного четырехзвенника 1–2–3–4, векторная схема которого приведена на рис. 3.

Введем в рассмотрение векторы $\vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3, \vec{l}_4$ и \vec{s} , как это показано на рис. 3.

Из анализа этого рисунка следует, что

$$\operatorname{tg} \varphi_s = \frac{l_2 \sin \varphi_2}{l_1 + l_2 \cos \varphi_2}. \quad (1)$$

Если ввести в рассмотрение угол φ_{4s} , который отсчитывается против часовой стрелки от вектора \vec{s} до вектора \vec{l}_4 и, как видно из рис. 3, выражается соотношением

$$\varphi_{4s} = \arccos \frac{l_4^2 + s^2 - l_3^2}{2l_4s}, \quad (2)$$

то тем самым устанавливается связь между положениями входного звена (кривошипа) 2

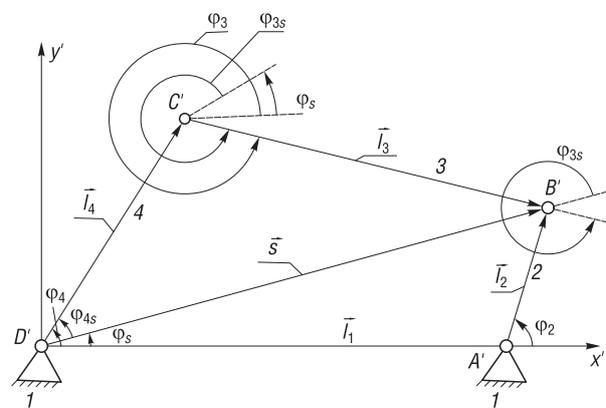


Рис. 3. Векторная схема шарнирного четырехзвенника исполнительного механизма рычажного станка
 Fig. 3. Vector diagram of the articulated four of the actuating mechanism of the lever machine

и звена 4 (см. рис. 2), а следовательно, и между положением кривошипа и рычага 5, так как последний перемещается относительно звена 4 только в вертикальной плоскости, при этом

$$\varphi_5 = \varphi_4 + \varphi_{45}, \quad (3)$$

где φ_{45} – постоянный угол, величина которого зависит от конструкции конкретного станка; φ_5 – угол, задающий положение рычага 5 в горизонтальной плоскости; $\varphi_4 = \varphi_{45} + \varphi_5$ – угол, определяющий положение звена 4. При обработке плоских поверхностей угол φ_5 определяет также и положение верхнего звена. Входящие в выражение (2) параметры s , l_3 и l_4 можно найти из рис. 3.

Положение рычага и верхнего звена в вертикальной плоскости. Заметим, что в общем случае звено 5 (см. рис. 2) расположено не горизонтально. Его положение в вертикальной плоскости зависит от геометрических параметров станка, длины поводка b и размеров сопряженных звеньев, как это показано на рис. 4, где l_5 – размер звена 5 до нулевого положения F_0 на нем поводка b ; M – смещение поводка; z_6 – расстояние между плоскостью шарнирного четырехзвенника и базовой плоскостью bb установки нижнего звена; h_H и h_B размеры нижнего и верхнего звеньев; x_G – расстояние между осью нижнего звена и осью возвратно-вращательного движения верхнего звена.

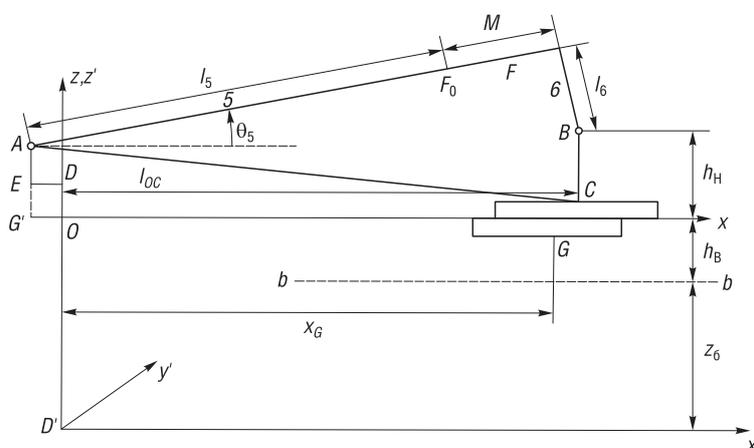


Рис. 4. Определению положения верхнего звена в вертикальной плоскости
Fig. 4. Determine the position of the upper link in the vertical plane

Угол между звеном 5 и горизонтальной плоскостью $D'x'y'$ обозначим θ_5 и будем отсчитывать его от горизонтальной плоскости против часовой стрелки. На рис. 4 θ_5 имеет положительное значение.

В результате введенных обозначений получаем размерную цепь, приведенную на рис. 5, где e – эксцентриситет, то есть расстояние между центрами G и C рабочих поверхностей сопряженных звеньев (инструмента и заготовки).

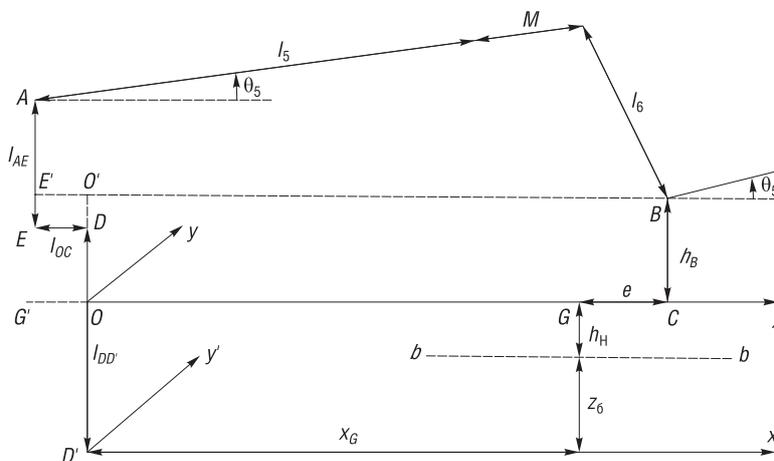


Рис. 5. Размерная цепь геометрических параметров станка, инструмента и заготовки
Fig. 5. Dimensional chain of geometrical parameters of the machine, tool and workpiece

Отметим, что в рассматриваемом случае эксцентриситет является переменной величиной и зависит от положения верхнего звена относительно нижнего.

Анализ приведенной на рис. 5 размерной цепи позволяет определить угол θ_5 и расстояние l_{OC} от оси возвратно-вращательного движения верхнего звена до центра C его рабочей поверхности.

Из рис. 5 видно, что $l_{OC} = l_{O'B}$, а $l_{O'B} = l_{E'B} - l_{ED}$.

Согласно построениям, ABE' – прямоугольный треугольник и

$$l_{BE'}^2 = l_{AB}^2 - l_{AE'}^2 = (l_5 + M)^2 + l_6^2 - l_{AE'}^2,$$

причем

$$l_{AE'} = l_{DD'} + l_{AE} - z_6 + h_H + h_B.$$

Обозначим

$$h_4 = l_{DD'} + l_{AE},$$

тогда

$$l_{AE'} = h_4 - (z_6 + h_H + h_B),$$

$$l_{OC} = \sqrt{(l_5 + M)^2 + l_6^2 - (h_4 - z_6 - h_H - h_B)^2} - l_{ED}. \quad (4)$$

Так как

$$\theta_5 = \angle FAB - \angle ABE',$$

и

$$\angle ABE' = \arctg \frac{l_{AE'}}{l_{OC} + l_{ED}} = \arctg \frac{h_4 - z_6 - h_H - h_B}{\sqrt{(l_5 + M)^2 + l_6^2 - (h_4 - z_6 - h_H - h_B)^2}},$$

$$\angle FAB = \arctg \frac{l_6}{l_5 + M},$$

то

$$\theta_5 = \arctg \frac{l_6}{l_5 + M} - \arctg \frac{h_4 - z_6 - h_H - h_B}{\sqrt{(l_5 + M)^2 + l_6^2 - (h_4 - z_6 - h_H - h_B)^2}}. \quad (5)$$

Таким образом, выражения (3) и (5) позволяют определить положение звена 5 для любого значения обобщенной координаты. Заметим, что угол θ_5 , описывающий положение этого звена в вертикальной плоскости, не зависит от обобщенной координаты и практически не изменяется в процессе обработки плоских поверхностей. Как видно из выражения (5), этот угол определяется геометрическими параметрами станка (x_G, z_6, h_4, l_5, l_6) и сопряженных звеньев (h_H, h_B), а также параметром M .

Геометрические параметры возвратно-вращательного движения верхнего звена.

Возвратно-вращательное движение верхнего звена определяется движением центра C его рабочей поверхности. Положение радиус-вектора \vec{l}_{OC} этого центра в горизонтальной плоскости будем характеризовать углом ψ_C (рис. 6). При обработке плоских поверхностей этот вектор и рычаг 5 все время расположены в одной вертикальной плоскости, следовательно

$$\psi_C = \varphi_5. \quad (6)$$

Геометрическими параметрами возвратно-вращательного движения верхнего звена являются углы $\psi_C^{\text{сим}}$, ψ_C^{min} и ψ_C^{max} , определяющие положение оси симметрии траектории K центра C и его крайние положения соответственно. Из выражений (3) и (6) видно, что для определения этих углов достаточно найти углы $\varphi_4^{\text{сим}}$, φ_4^{min} и φ_4^{max} , которые характеризуют возвратно-вращательное движение коромысла.

Из анализа рис. 3 видно, что коромысло 4, а значит, и верхнее звено 5 (см. рис. 2) крайние положения занимают тогда, когда звенья 2 и 3 лежат на одной прямой. При этом нетрудно заметить, что чем меньше длина кривошипа l_2 , тем меньше диапазон изменения угла φ_4 . В случае, когда $l_2 \rightarrow 0$, φ_4 стремится к $\varphi_4^{\text{сим}}$. И если принять $l_2 = 0$, то механизм станет неподвижным и φ_4 будет равным $\varphi_4^{\text{сим}}$. Что касается аналитических выражений для углов $\varphi_4^{\text{сим}}$, φ_4^{max} и φ_4^{min} , то, как следует из рис. 3, они следующие:

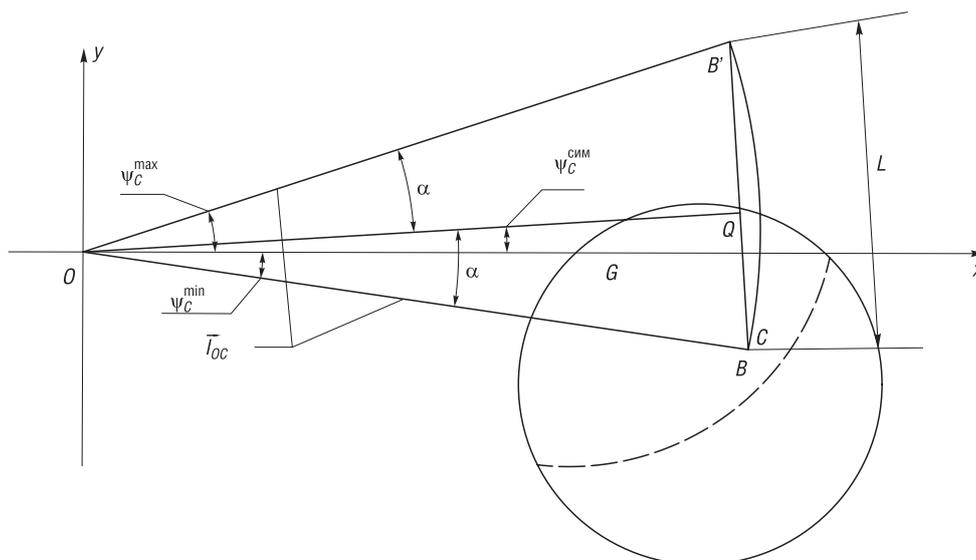


Рис. 6. Траектория возвратно-вращательного движения центра с рабочей поверхностью верхнего звена
 Fig. 6. Trajectory of the reciprocating rotational movement of the center with the working surface of the upper link

$$\cos \varphi_4^{\text{сим}} = \frac{l_1^2 + l_4^2 - l_3^2}{2l_1l_4}, \quad (7)$$

$$\cos \varphi_4^{\text{max}} = \frac{l_1^2 + l_4^2 - (l_2 + l_3)^2}{2l_1l_4}, \quad (8)$$

$$\cos \varphi_4^{\text{min}} = \frac{l_1^2 + l_4^2 - (l_3 - l_2)^2}{2l_1l_4}. \quad (9)$$

Таким образом, выражения (6)–(9) и (3) позволяют определить предельные и средние значения углов φ_4 , φ_5 и ψ_C при обработке плоскостей.

Анализ рис. 3 показывает также, что значения $(\varphi_2^{\text{п}})_1$ и $(\varphi_2^{\text{п}})_2$ обобщенной координаты φ_2 , при которых происходит перемена направления движения верхнего звена, определяются соотношениями:

$$(\varphi_2^{\text{п}})_1 = \pi - \arccos \frac{l_1^2 + (l_2 + l_3)^2 - l_4^2}{2l_1(l_2 + l_3)}, \quad (10)$$

$$(\varphi_2^{\text{п}})_2 = 2\pi - \arccos \frac{l_1^2 + (l_3 - l_2)^2 - l_4^2}{2l_1(l_3 - l_2)}. \quad (11)$$

Следовательно, при вращении кривошипа против часовой стрелки верхнее звено, а также коленосило и рычаг движутся против часовой стрелки при $0 \leq \varphi_2 < (\varphi_2^{\text{п}})_1$ и $(\varphi_2^{\text{п}})_2 < \varphi_2 \leq 2\pi$ и по часовой стрелке при $(\varphi_2^{\text{п}})_1 < \varphi_2 < (\varphi_2^{\text{п}})_2$. Значения обобщенной координаты $\varphi_2 = (\varphi_2^{\text{п}})_1$ и $\varphi_2 = (\varphi_2^{\text{п}})_2$ являются точками реверса, то есть точками мгновенной остановки верхнего звена в его возвратно-вращательном движении.

Выясним условия, при которых возвратно-вращательное движение верхнего звена будет симметричным относительно оси Ox , проходящей через центр G рабочей поверхности нижнего звена. Согласно рис. 6, это условие запишется следующим образом: $\psi_4^{\text{сим}} = 0$. Тогда с учетом выражений (3), (5) и (6) получаем, что

$$l_3 = \sqrt{l_1^2 + l_4^2 - 2l_1l_4 \cos \varphi_{45}}. \quad (12)$$

Связь между длиной штриха и длиной кривошипа. Проекция на горизонтальную плоскость расстояния между крайними положениями центра B шарика поводка (см. рис. 6) является геометрическим наладочным параметром и называется длиной штриха L .

Поскольку при обработке плоских поверхностей центр шарика поводка и центр C рабочей поверхности верхнего звена находятся на одной вертикальной линии, то расстояние между крайними положениями центра C также равно L .

В рычажных станках величина L регулируется посредством изменения длины кривошипа l_2 , следовательно, необходимо установить аналитическую связь между этими геометрическими параметрами.

Введем обозначение (см. рис. 6): $\alpha = \frac{\psi_C^{\max} - \psi_C^{\min}}{2}$. Тогда $\psi_C^{\max} = \psi_C^{\text{сим}} + \alpha$, $\psi_C^{\min} = \psi_C^{\text{сим}} - \alpha$.

Учитывая выражение для угла α , получаем:

$$\psi_C^{\max} = \psi_C^{\text{сим}} + \arcsin \frac{L}{2l_{OC}}, \psi_C^{\min} = \psi_C^{\text{сим}} - \arcsin \frac{L}{2l_{OC}}.$$

Аналогичные равенства можно записать и для угла φ_4 :

$$\varphi_4^{\max} = \varphi_4^{\text{сим}} + \arcsin \frac{L}{2l_{OC}}, \varphi_4^{\min} = \varphi_4^{\text{сим}} - \arcsin \frac{L}{2l_{OC}}.$$

Учитывая зависимости (6) и (11), определим выражение для l_2 :

$$l_2 = \sqrt{l_1^2 + l_4^2 - 2l_1l_4 \cos \left(\varphi_4^{\text{сим}} + \arcsin \frac{L}{2l_{OC}} \right)} - l_3. \quad (13)$$

Заключение. В результате проведенного исследования шарнирного четырехзвенника исполнительного механизма станка установлена аналитическая связь между входным и выходным звеньями этого механизма. Это дает возможность рассчитать длину первого из отмеченных звеньев в зависимости от требуемой величины амплитуды колебательного движения второго из них и создает предпосылки для разработки инженерных методов управления процессом формообразования высокоточных конических поверхностей в условиях свободного притирания, позволяя тем самым исключить необходимость проведения предварительных трудоемких экспериментов по выявлению оптимальных наладочных параметров технологического оборудования в каждом конкретном случае.

Список использованных источников

1. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. – М.: Высш. шк., 1963. – 519 с.
2. Зубаков, В. Г. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков, М. Н. Семibrатов, С. К. Штандель; под ред. М. Н. Семibrатова. – М.: Машиностроение, 1985. – 368 с.
3. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. – Минск: ВУЗ – ЮНИТИ, 1997. – 176 с.
4. Козерук, А. С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на основе математического моделирования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01, 05.02.08 / А. С. Козерук. – Минск, 1997. – 317 л.
5. Сулим, А. М. Производство оптических деталей / А. В. Сулим. – М.: Высш. шк., 1969. – 303 с.
6. Артоboлевский, И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоboлевский. – М.: Наука, 1988. – 640 с.

References

1. Bardin A. N. *Optical glass technology*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1963. 519 p. (in Russian).
2. Zubakov, V. G., Semibratov M. N., Shtandel S. K. *Optical Parts Technology*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 368 p. (in Russian).
3. Kozeruk A. S. *Shaping Precision Surfaces*. Minsk, VUZ – YuNITI Publ., 1997. 176 p. (in Russian).
4. Kozeruk A. S. (1997) *Managing the shaping of precision surfaces of machine parts and devices based on mathematical modeling*. Minsk. 317 p. (in Russian).
5. Sulim, A. M. *Production of optical parts*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1969. 303 p. (in Russian).
6. Artobolevskii I. I. *Theory of Mechanisms and Machines*. Moscow, Nauka Publ., 1988. 640 p. (in Russian).

Информация об авторах

Козерук Альбин Степанович – доктор технических наук, профессор, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: akozeryk@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-5484-9294>

Диас Гонсалес Рафаэль Орландос – аспирант, Университетский политехнический институт Сантьяго Мариньо (Мерида, Венесуэла).

Филонова Марина Игоревна – кандидат технических наук, доцент, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: filonovami@mail.ru

Кузнечик Валерия Ольгердовна – кандидат технических наук, доцент, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v-kuzn@tut.by. <https://orcid.org/0000-0001-5348-5871>

Варопай Евгений Николаевич – магистрант, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zhkakop@gmail.com

Information about the authors

Albin S. Kozeruk – D. Sc. (Engineering), Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: akozeryk@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-5484-9294>

Rafael' Orlandos Dias Gonsales – Graduate Student, Instituto Universitario Politecnico Santiago Marino (Merida, Venezuela)

Marina I. Filonova – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: filonovami@mail.ru

Valeria O. Kuznechik – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v-kuzn@tut.by. <https://orcid.org/0000-0001-5348-5871>

Evgeny N. Varopay – Undergraduate, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zhkakop@gmail.com