

Р. В. АМБАРЦУМЯНЦ

СИНТЕЗ ШЕСТИЗВЕННОГО РЫЧАЖНОГО МЕХАНИЗМА ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПОВОРОТА С РЕГУЛИРУЕМОЙ ВЕЛИЧИНОЙ УГЛА ВЫСТОЯ

В современных машинах-автоматах часто требуется получить прерывистое движение ведомого звена при непрерывном вращении ведущего звена. При этом требуется еще, чтобы угол выстоя поддавался регулировке. Для этого обычно используются зубчато-рычажные механизмы.

В настоящей работе рассматривается задача синтеза шестизвенового рычажного механизма одностороннего прерывистого движения ведомого звена с плавным регулированием величины угла выстоя в сравнительно большом диапазоне. Базисным механизмом является равнобедренный кривошипно-ползунный механизм OAB (фиг. 1), к точке шатуна AB и к стойке которого присоединяется трехшарнирная двухподковная группа MCF . Синтез механизма производится в следующие четыре этапа:

1. Определяется положение точки M на шатунной оси AB и длина звена MC ;
2. Устанавливается область возможных положений центра F вращения ведомого звена CF , обеспечивающая проворачиваемость этого звена;
3. Устанавливается условие, при котором предотвращается неопределенность в положении двухподковой группы MCF в период вращения ведомого звена;
4. Определяется длина ведомого звена CF и кривая возможных положений его центра вращения, обеспечивающих заданный диапазон изменения величины угла выстоя.

Отнесем схему механизма (фиг. 1) к прямоугольной системе координат XOY с началом в центре вращения ведущего кривошипа OA и осью $X-X$, совпадающей с линией движения ползуна. Примем следующие обозначения: $OA = AB = 1$,

l — расстояние точки M шатуна AB от точки A ;

l — длина шатуна MC ;

f — длина ведомого звена CF ;

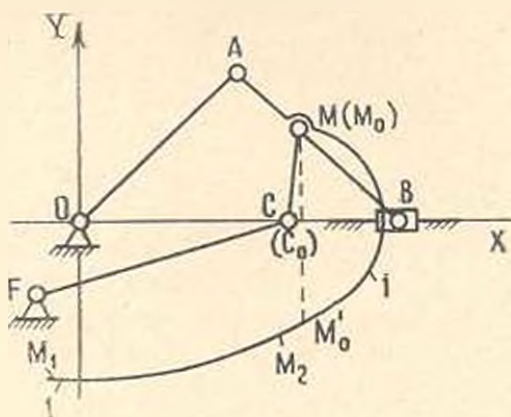
x_F, y_F — координаты точки F ;

ϕ — угол, образуемый ведомым звеном CF с осью $X-X$ в положении выстоя;

Φ — угол выстоя.

1. Определение положения точки M на оси шатуна AB и длины звена MC

Определение указанных величин производим методом, изложенным в работе автора [2]. Вкратце он заключается в следующем. Любая точка осевой линии шатуна AB базисного механизма описывает эллипс 1—1 (фиг. 1). Участок последнего, симметричный относительно оси $X-X$, может быть аппроксимирован дугой окружности с центром C_0 на оси $X-X$. При этом длина дуги эллипса зависит от требуемого максимального значения угла выстоя*.



Фиг. 1.

Величиной λ задаемся в пределах $0 < \lambda < \lambda_{\max}$, если направления вращения ведущего и ведомого кривошипов совпадают, и $\lambda \geq 1 - \lambda_{\max}$, если указанные направления вращения противоположны. Значение $\lambda_{\max}$ определяем решением уравнения

$$A\lambda_{\max}^2 + B\lambda_{\max} + C = 0 \quad (1)$$

где

$$A = - \left(2 + 3\cos\varphi_1 + \cos^4 \frac{1}{2} \varphi_1 \right), \quad B = 2 \left(\cos^4 \frac{1}{2} \varphi_1 + \cos\varphi_1 \right)$$

$$C = 2 - \cos \frac{1}{2} \varphi_1 + \cos\varphi_1, \quad \varphi_1 = \frac{1}{2} \Phi$$

Абсцисса d центра C_0 аппроксимирующей окружности определяется по формуле

$$d = \frac{2\lambda(1 + \cos\varphi_1)}{1 + \lambda} \quad (2)$$

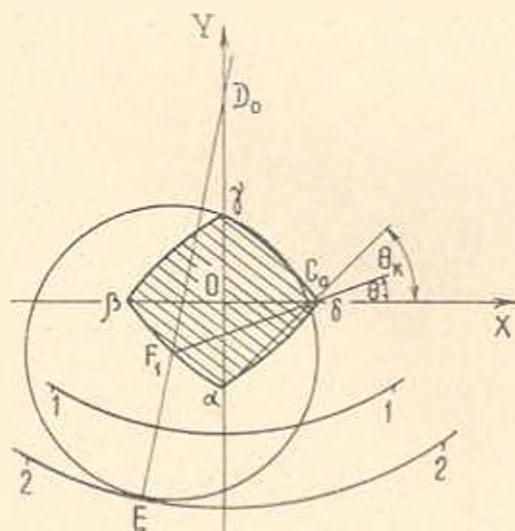
Длина шатуна

* Подробнее см. ниже.

$$l = \frac{\sqrt{(1-\lambda)^2 + 2\lambda \left[8\lambda \cos^4 \frac{\varphi_1}{2} - (1-\lambda)^2 \left(\cos^4 \frac{\varphi_1}{2} + \cos \varphi_1 \right) \right]}}{1+\lambda} \quad (3)$$

2. Область возможных положений центра вращения ведомого звена, в которой обеспечивается его проворачиваемость

Строим эллипс 2—2, экидистантный эллипсу* 1—1 (фиг. 2), расстояние между которыми по нормали равно длине шатуна MC . Траектория шарнирной точки C , проходящая через точку C_0 , не должна выйти за пределы эллипса 2—2: в противном случае проворачиваемость** механизма невозможна. Из фиг. 2 видно, что этому условию удовлетворяют положения точки F , находящиеся либо во втором, либо в третьем квадрантах. При положениях точки F в первом или в четвертом квадрантах, хотя траектория точки C может проходить через точку C_0 (т. е. удовлетворяется условие останковки), проворачиваемость механизма невозможна. Ясно, что предельные положения центра вращения ведомого звена соответствуют тем крайним положениям точки $F_1(x_{F1}, y_{F1})$, при которых траектория точки C соприкасается с эллипсом 2—2. Переходим к определению координат точки F_1 .



Фиг. 2

Известно, что дуга эллипса M_1M_2 (фиг. 1), симметричная относительно оси $Y-Y$, аппроксимируется дугой окружности радиуса r , с центром D_0 на оси $Y-Y$ с ординатой d_1 , величины которых определяются по уравнениям [4]

* На фиг. показана только часть указанного эллипса.

** Под условием проворачиваемости мы понимаем, в данном случае, условие существования ведущего и ведомого звеньев.

$$d_1 = \frac{b + y_1}{2} k \quad (4)$$

$$r_1 = \sqrt{a^2 + d_1^2 + \frac{k^2}{8} (b^2 + 6by_1 + y_1^2)} \quad (5)$$

где

$$b = 1 - \nu, \quad a = 1 + \nu, \quad y_1 = (1 - \nu) \sin y_1, \quad k = -\frac{4\nu}{(1 - \nu)^2}$$

Следовательно, участок экидистантного эллипса 2—2, соответствующий дуге $M_1 M_2$ эллипса, также можно заменить дугой окружности радиуса $r_1 + l$, проведенной из точки $D_0(0, d_1)$. Пусть предельное положение центра вращения ведомого звена находится в точке F_1 (фиг. 2) и траектория точки C соприкасается с эллипсом 2—2 в точке E . Тогда, поскольку нормаль в точке соприкосновения кривых проходит через центры кривизны (в нашем случае через точки F_1 и D_0), то, как следует из фиг. 2,

$$F_1 D_0 = ED_0 - EF_1 = r_1 + l - f_{\text{пр.}}$$

где $f_{\text{пр.}}$ — предельное значение длины звена CF в положении точки F_1 . Отрезок же

$$F_1 D_0 = \sqrt{x_{F_1}^2 + (y_{F_1} - d_1)^2}$$

На основании двух последних уравнений находим

$$x_{F_1}^2 + (y_{F_1} - d_1)^2 = (r_1 + l - f_{\text{пр.}})^2$$

Учитывая, что точка F_1 находится на прямой с угловым коэффициентом* k_1 и одновременно на окружности радиуса $f_{\text{пр.}}$, проведенной из точки C_0 , то для нахождения неизвестных величин x_{F_1} , y_{F_1} и $f_{\text{пр.}}$ составим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} y_{F_1} &= k_1 (x_{F_1} - d) \\ (x_{F_1} - d)^2 + y_{F_1}^2 &= f_{\text{пр.}}^2 \\ (y_{F_1} - d_1)^2 + x_{F_1}^2 &= (r_1 + l - f_{\text{пр.}})^2 \end{aligned} \quad (6)$$

Решая систему (6) относительно $f_{\text{пр.}}$, получим

$$A_1 f_{\text{пр.}}^2 + B_1 f_{\text{пр.}} + C_1 = 0 \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= 4 \left[r_1 + l - \frac{(d - k_1 d_1)^2}{(1 - k_1^2)(r_1 + l)} \right], \quad B_1 = 2[2d^2 - (r_1 + l)^2] \\ C_1 &= (r_1 + l) [(r_1 + l)^2 - 4d^2] + \frac{4d^2}{r_1 + l} \end{aligned} \quad (8)$$

* Определение величин k_1 см. дальше.

$$d_1 = \frac{b + y_1}{2} k \quad (4)$$

$$r_1 = \sqrt{a^2 - d_1^2 - \frac{k^2}{8} (b^2 + 6by_1 + y_1^2)} \quad (5)$$

где

$$b = 1 - \epsilon, \quad a = 1 + \epsilon, \quad y_1 = (1 - \epsilon) \sin \mu_1, \quad k = \frac{4\epsilon}{(1 - \epsilon)^2}$$

Следовательно, участок эллипсоставного валинга 2-2, соответствующий дуге $M_1 M_2$ эллипса, также можно заменить дугой окружности радиуса $r_1 + l$, проведенной из точки $D_0(0, d_1)$. Пусть предельное положение центра вращения ведомого звена находится в точке F_1 (фиг. 2) и траектория точки C соприкасается с эллипсом 2-2 в точке E . Тогда, поскольку нормаль в точке соприкосновения кривых проходит через центры кривизны (в нашем случае через точки F_1 и D_0), то, как следует из фиг. 2,

$$F_1 D_0 = ED_0 - EF_1 = r_1 + l - f_{\text{пр.}}$$

где $f_{\text{пр.}}$ — предельное значение длины звена CF в положении точки F_1 . Отрезок же

$$F_1 D_0 = \sqrt{x_{F1}^2 + (y_{F1} - d_1)^2}$$

На основании двух последних уравнений находим

$$x_{F1}^2 + (y_{F1} - d_1)^2 = (r_1 + l - f_{\text{пр.}})^2$$

Учитывая, что точка F_1 находится на прямой с угловым коэффициентом* k_1 и одновременно на окружности радиуса $f_{\text{пр.}}$, проведенной из точки C_0 , то для нахождения неизвестных величин x_{F1} , y_{F1} и $f_{\text{пр.}}$ составим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} y_{F1} &= k_1 (x_{F1} - d) \\ (x_{F1} - d)^2 - y_{F1}^2 &= f_{\text{пр.}}^2 \\ (y_{F1} - d_1)^2 + x_{F1}^2 &= (r_1 + l - f_{\text{пр.}})^2 \end{aligned} \quad (6)$$

Решая систему (6) относительно $f_{\text{пр.}}$, получим

$$A_1 f_{\text{пр.}}^2 + B_1 f_{\text{пр.}} + C_1 = 0 \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= 4 \left[r_1 + l - \frac{(d - k_1 d_1)^2}{(1 - k_1^2)(r_1 + l)} \right], \quad B_1 = 2 [2d^2 - (r_1 + l)^2] \\ C_1 &= (r_1 + l) [(r_1 + l)^2 - 4d^2] + \frac{4d^2}{r_1 + l} \end{aligned} \quad (8)$$

* Определение величины k_1 см. дальше.

После определения величины f_{np} координаты точки F_1 проще определить по следующим формулам (см. фиг. 2)

$$\begin{aligned}x_{F1} &= f_{np} \cos \theta - d \\y_{F1} &= f_{np} \sin \theta\end{aligned}\quad (8)$$

где

$$\theta = \arctg k_1$$

Рассмотрим теперь вопрос о возможных пределах изменения величины угла θ , соответственно и коэффициента k_1 . Учитывая, что этот угол может быть как положительным (как показано на фиг. 2), так и отрицательным^{*}, его можно парировать в пределах

$$-\theta_k < \theta < \theta_k \quad (9)$$

где θ_k — предельное значение угла θ , при котором точка F находится на оси $Y-Y$ и

$$\theta_k = \pm \arccos \frac{f_1}{d}$$

где f_1 — предельная длина ведомого звена при $\theta = \theta_k$ [2]

$$f_1 = \frac{d^2 + (1 - \lambda + l)^2}{2(1 - \lambda + l)}$$

Задаваясь величиной θ в пределах, устанавливаемых неравенством (9), определяя предельные положения точки F_1 и плавно соединяя их, получим кривую $\alpha - \beta$ (фиг. 2). Совершенно очевидно, что во втором квадранте существует симметричная ей кривая $\gamma - \delta$. Если взять центр аппроксимирующей окружности на оси $X-X$ в противоположной стороне^{**} от точки O , то такая же картина получается в первом и четвертом квадрантах. Следовательно, площадь, ограниченная кривой $\alpha\beta\gamma\delta$, — это геометрическое место возможных положений точки F , обеспечивающее существование ведомого кривошипа.

3. Условие, предотвращающее неопределенность в положении двухповодковой группы в период вращения ведомого звена

Прежде чем перейти к выявлению указанного условия, проследим за последовательностью изменения величины угла FCM (фиг. 1) с начального момента выстоя. Этот угол уменьшается и в период вращения ведомого звена принимает минимальное значение, после чего опять увеличивается. В частности, когда центр вращения ведомого звена на границе заштрихованной области (фиг. 2), появляется неопределенность в положении двухповодковой группы. Для предотвращения этого задается минимально допустимым значением $\angle FCM = \gamma$.

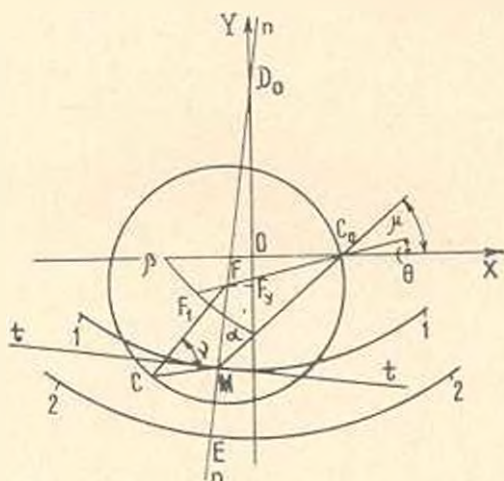
* В случае нахождения точки F во втором квадранте.

** Имеется ввиду первоначальное положение точки C_0 .

Рассмотрим вопрос об определении длины ведомого кривошипа и координат его центра вращения при заданном значении γ . Если известно значение θ , то центр вращения ведомого кривошипа F необходимо взять на прямой

$$y = k_1(x - d) \quad (10)$$

Как уже сказано, если точка F совпадает с точкой F_1 , возникает неопределенность в положении группы MCF . При этом положение шатунной точки M на эллипсе 1—1 найдем на пересечении нормали, построенной в точке E соприкасания эллипса 2—2 и окружности, описываемой точкой* C (фиг. 3). Совершенно очевидно, что, если точка F находится внутри заштрихованной области, то неопределенность в положении группы MCF предотвращается, а угол FCM принимает минимальное значение в том положении шатунной точки M на эллипсе 1—1, где восстановленная нормаль проходит через точку F .



Фиг. 3.

Обозначим через x_M и y_M координаты точки M в положении механизма, соответствующем минимальному значению угла γ . Допустим, центр вращения ведомого кривошипа находится в точке F (фиг. 3). Тогда уравнение прямой, проходящей через точку F , будет

$$y - y_F = k_2(x - x_F) \quad (11)$$

причем величина углового коэффициента

$$k_2 = -\frac{1}{k_3} \quad (12)$$

где k_3 — угловой коэффициент касательной $t-t$, проведенной в точке $M(x_M, y_M)$ эллипса 1—1.

* На фиг. 3 она совпадает с неопределенным положением группы.

Так как $k_2 = \left(\frac{dy}{dx}\right)_M$ и $\frac{x^2}{(1+\lambda)^2} + \frac{y^2}{(1-\lambda)^2} = 1$, то

$$k_2 = -\frac{x_M}{y_M} \left(\frac{1-\lambda}{1+\lambda}\right)^2 \quad (13)$$

Из $\triangle FCM$, учитывая, что $(MF)^2 = (x_F - x_M)^2 + (y_F - y_M)^2$, найдем (фиг. 3)

$$2fl \cos \gamma = f^2 + l^2 - (x_F - x_M)^2 - (y_F - y_M)^2 \quad (14)$$

С другой стороны, из $\triangle FC_0M$, поскольку

$$(C_0M)^2 = (x_M - d)^2 + y_M^2$$

имеем

$$\begin{aligned} (x_F - x_M)^2 + (y_F - y_M)^2 &= f^2 + (x_M - d)^2 + y_M^2 - \\ &- 2f(MC_0) \cos(\mu - \theta) \end{aligned} \quad (15)$$

где μ — угол, образованный прямой MC_0 с осью $X-X$. Из фиг. 3 следует, что

$$\cos \mu = \frac{x_M - d}{C_0M}, \quad \sin \mu = \frac{y_M}{C_0M} \quad (16)$$

Согласно соотношениям (15) и (16), получим

$$\begin{aligned} (x_F - x_M)^2 + (y_F - y_M)^2 &= f^2 + (x_M - d)^2 + y_M^2 - \\ &- 2f(x_M - d) \cos \mu - 2fy_M \sin \mu \end{aligned} \quad (17)$$

Учитывая, что координаты точки M удовлетворяют равенству (11), а $f^2 = (x_F - d)^2 + y_F^2$, то для нахождения величин неизвестных x_F , y_F , f , y_M и x_M составим следующую систему уравнений:

$$y_M - y_F = \frac{y_M}{x_M} \left(\frac{1+\lambda}{1-\lambda}\right)^2 (x_M - x_F)$$

$$\frac{x_M^2}{(1+\lambda)^2} + \frac{y_M^2}{(1-\lambda)^2} = 1$$

$$2fl \cos \gamma = f^2 + l^2 - (x_F - x_M)^2 - (y_F - y_M)^2 \quad (18)$$

$$(x_F - d)^2 + y_F^2 = f^2$$

$$(x_F - x_M)^2 + (y_F - y_M)^2 = f^2 + (x_M - d)^2 + y_M^2 - 2f(x_M - d) \cos \mu - 2fy_M \sin \mu$$

Решение системы (18) довольно сложно, поэтому задачу целесообразно решать следующим образом. Задаемся координатами точки F так, чтобы она находилась внутри кривой $\gamma_2 \gamma_3 \gamma_4$. Для нахождения

мый кривошип (для наглядности на фиг. 4 показано несколько последовательных положений механизма). Когда точка M находится в положении M_0 (начало участка приближения), точка C находится в C_1 . Следовательно, звено FC не может останавливаться, так как исходным положением для остановки является положение FC_0 . В дальнейшем точка C совпадает с C_0 , когда точка M совпадает с $M_2(x_2, y_2)$, находящейся на пересечении прямой FC_0 с эллипсом 1-1. Последнее следует из того, что окружность точки C и окружность радиуса l , проведенная из точки M_2 , ввиду их соприкосновения в точке C_0 , имеют общую нормаль. Значит выстой ведомого кривошипа происходит только на дуге M_1M_0 эллипса. Положение ведущего кривошипа, соответствующее точке M_2 , определяется следующим образом.

Из прямоугольного треугольника $C_0M_2M_1$ имеем

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{y_2}{x_2 - d} = \frac{(1 - \lambda) \sin \varphi_2}{(1 + \lambda) \cos \varphi_2 - d} \quad (19)$$

где φ_2 — угол, образованный ведущим кривошипом с осью $X-X$ в положении, соответствующем точке M_2 . Преобразуя выражение (19) и решая его относительно φ_2 , получим

$$(\operatorname{tg} \varphi_2)_{12} = \frac{(1 - \lambda)^2 \operatorname{tg} \Theta + d \operatorname{tg} \Theta \sqrt{(1 + \lambda)^2 \operatorname{tg}^2 \Theta + (1 - \lambda)^2 - d^2 \operatorname{tg}^2 \Theta}}{(1 - \lambda)^2 - d^2 \operatorname{tg}^2 \Theta} \quad (20)$$

Из прямоугольного треугольника FF_2C_0 находим

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{y_F}{x_F - d}$$

Следовательно, величина угла выстоя

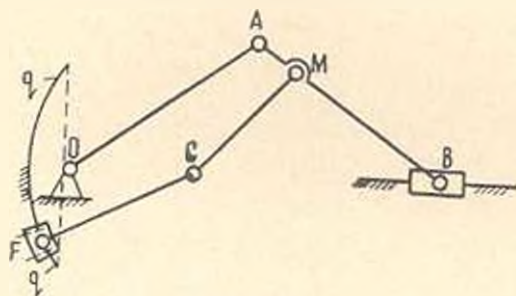
$$\Phi = |\varphi_1 \pm \varphi_2| \quad (21)$$

Здесь знак плюс относится к случаю, когда точка F находится во втором квадранте или ведущий кривошип вращается по часовой стрелке, знак минус — к случаю, показанному на фиг. 4. Если задана величина Φ , то соответствующим выбором положения точки F получим требуемый угол выстоя в ранее спроектированном механизме с углом выстоя $\Phi_1 > \Phi$. При этом центр F необходимо взять на прямой (10) внутри заштрихованной области (фиг. 5). Величина угла Θ определяется из выражения (19), если предварительно определить значение угла φ_2 из равенства (21).

Из всего сказанного следует, что, выполнив ведомое звено изменяемой длины, перемещая его центр вращения во втором, либо в третьем квадрантах, получим плавное изменение величины угла выстоя. Те же результаты можно получить без изменения длины звена FC , а перемещением точки F по дуге окружности $q-q$ радиуса f , проведенной из точки C_0 (фиг. 4).

Итак, если задан диапазон регулировки величины угла выстоя $\Phi_2 \leq \Phi \leq \Phi_1$, то синтез шестизвенника производим в следующей последовательности. Определяем величины λ , d , l из условия обеспечения

величины угла выстоя* $\Phi_1 > \Phi_3$. Зная величину $\varphi_1 = \frac{1}{2} \Phi$, из равенства (20) определяем значение угла ε_1 для двух предельных значений Φ_2 и Φ_3 . Из выражения (19) находим предельные значения угла $\Theta_{пр.}$. Задаваясь минимальным значением угла γ между звеньями CM и CF , определяем координаты центра вращения и его длину при предельных значениях $\Theta_{пр.}$ (методом, изложенным в третьем этапе этой работы). Так как для двух предельных значений $\Theta_{пр.}$ получаются два значения f и положения точки F , то из них следует выбирать те, которые в двух предельных положениях центра вращения ведомого кривошипа удовлетворяют условию обеспечения заданного допускаемого значения его угла передачи движения в момент трогания.



Фиг. 5.

Приведем числовой пример. Определить размеры шестизвенного механизма с регулируемой величиной угла выстоя в диапазоне $20^\circ \leq \Phi \leq 80^\circ$ при $\gamma = 20^\circ$.

Принимаем $\Phi_1 = 100^\circ$. Параметры механизма, найденные по формулам (2), (3), (20), (19), (8'), имеют следующие значения:

$$l = 0.2000; \quad d = 0.5476; \quad l = 0.6537; \quad \varphi_1 = \pm 30^\circ$$

$$\Theta_{пр.} = \pm 40^\circ; \quad x_F = -0.0680; \quad y_F = \pm 0.4652; \quad f = 0.7236$$

Угол передачи в момент „трогания“ ведомого звена, соответствующий двум крайним положениям точки F , равен 25° . Механизм показан на фиг. 5. Поскольку равнобедренный кривошипно-ползунный механизм имеет мертвые положения, то в качестве исходного механизма можно использовать трехзвенный планетарный механизм [3] и другие, воспроизводящие эллипс.

В заключение отметим, что указанный метод справедлив для всех рычажных механизмов, воспроизводящих выпуклые шатунные кривые.

Одесский технологический институт
им. М. В. Ломоносова

Поступила 21 XI 1969

* Величину $\Phi_1 = \Phi_3 + (10 \pm 20)^\circ$, что делается для того, чтобы избежать положения точки F на оси $Y-Y$, при котором появляется неопределенность в положении группы MCF и период вращения ведомого кривошипа.

Ռ. Վ. ՀԱՄԱՐՏՈՒՄՅԱՆՑ

ԿԱՆԳԱՌԻ ԱՆԿՅԱՆ ԿԱՐԳԱՎՈՐՎՈՂ ՄԵԾՈՒԹՅԱՄԲ ՊԱՐԹԵՐԱԿԱՆ
ՇՐՋՄԱՆ ՎԵՑՈՂԱԿ ԸՄԱԿԱՎՈՐ ՄԵՆԱԼԵԶՄԻ ՄԻՆԹԵՋՐ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. լ. մ.

Հուծված է կանգնման անկյան կարգավորվող մեծությամբ պարբերական շրջման վեցօղակ լծակավոր մեխանիզմի սինթեզման խնդիրը:

Բացառությամբ սահող օղակի երկարության, որն որոշվում է նրա լրիվ շրջման ապահովելու պայմանից, մեխանիզմի պարամետրերի անհայտ մեծությունները որոշվում են շրջանագծի աղեղին շարժաթևային կորի տրված հատվածի լավագույն մոտեցման մեթոդով: Կանգնման անկյան մեծության կարգավորման տրված միջակայքը ստացվում է շրջանագծի աղեղով տանող շուտավիկի պտտման կենտրոնի տեղափոխությամբ:

SYNTHESIS OF A SIX-BAR LINKAGE DWELL
MECHANISM WITH AN ADJUSTABLE STOP ANGLE

R. V. AMBARTSUMIANTS

S u m m a r y

The problem of synthesis of a six-bar linkage dwell mechanism with an adjustable stop angle of a driven crank is solved.

Except the length of the driven link (determined from the condition of presence of a driven crank) the unknown mechanism parameters are found by the method of best approximation of the given coupler curve section to the circumference arc. The specified adjustment range of the stop angle is obtained by displacement of the driven link revolution centre along the circumference arc.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Артоболевский И. И., Левитский Н. И., Черкудинов С. А. Синтез плоских механизмов. Физматгиз, М., 1959.
2. Амбарцумян Р. В. Синтез шестизвенного механизма с периодической остановкой ведомого кривошипа. Республ. межведомст. научн. техн. сб. ТММ, № 9, Харьков, 1970.
3. Амбарцумян Р. В. Синтез пятизвенного зубчато-рычажного механизма с периодической остановкой ведомого кривошипа. Изв. АН Арм. ССР, Механика, т. 23, № 3, 1970.
4. Левитский Н. И. Синтез механизмов по Чебышеву. Изд. АН СССР, 1946.