*Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LX, вып. 1, 1970 г.*

# КАРТИНА ВАРИАЦИЙ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

*В. И. Вдовиченко*

Кривошипно-шатунный механизм в общем виде однозначно определяется тремя независимыми параметрами, например, следующими: радиусом кривошипа * $r$; относительной длиной шатуна $\lambda = \frac{l}{r}$ ($l$ — длина шатуна); относительным дезаксиалом $\varepsilon = \frac{e}{r}$ ($e$ — величина дезаксиала).

Будем рассматривать эти параметры как переменные. Тогда области задания их определяют область изменения кривошипно-шатунных механизмов в целом.

Если принять область задания радиуса кривошипа $0<r<\infty$, то области задания остальных параметров определятся возможностью существования механизма.**

Очевидно существование механизма в интервалах изменения $0<l<\infty$, $0<e<l+r$; разделив эти интервалы на $r$, получим

$$0<\lambda<\infty,\ 0<\varepsilon<\lambda+1.$$

Интервалы существования механизма с полным оборотом кривошипа определяются условием проворачиваемости ***

---

* Под кривошипом понимаем и те разновидности механизма, у которых это звено не совершает полного оборота.

** Механизма вообще, включая и механизмы с ограниченным поворотом кривошипа.

*** Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин. Машгиз, 1953.

$$r<l-e \qquad (1)$$

или

$$1<\lambda-\varepsilon. \qquad (2)$$

Из формулы (2) следует, что при $\varepsilon=0$ $\lambda_{min}=1$; верхнее значение $\lambda$ не ограничивается.

Из формулы (2) также следует, что кривошип проворачивается при

$$\varepsilon<\lambda-1. \qquad (3)$$

Таким образом, кривошипно-шатунный механизм существует в интервалах

$$0<r<\infty, \quad 1\leqslant\lambda<\infty, \quad 0\leqslant\varepsilon<\lambda-1.$$

Для решения практических задач, связанных с анализом свойств различных видоизменений кривошипно-шатунного механизма и синтезом по заданным параметрам, очень удобной является картина, наглядно охватывающая все теоретически возможные варианты его при непрерывном изменении параметров $r$, $\lambda$, $\varepsilon$ внутри заданных областей.

Картина вариаций получается простой и наглядной, если интервал возможных значений $\lambda$ ограничить одним или двумя фиксированными значениями (рис. 1).

Порядок построения.

1. Проводятся оси координат и окружность радиуса $\rho$ с центром в начале координат.

Величина $\rho$ выбирается произвольно с учетом размера чертежа и удобства вычислений.

2. Определяется изображение шатуна

$$l_{и}=\rho\lambda. \qquad (4)$$

3. Радиусами $l_{и}+\rho$, $l_{и}-\rho$ проводятся окружности с центрами в начале координат. В дальнейшем они будут называться, соответственно, окружность верхних *ОВМП* и нижних *ОНМП* мертвых положений.

4. На оси абсцисс наносится шкала значений $\varepsilon$ в интервале $0, \lambda+1$, число делений которой определяется требуемой точностью. Через каждое деление проводится прямая, параллельная оси ординат. Отрезки этих прямых, заключенные между окружностями *ОВМП* и *ОНМП*, изображают ход ползуна $H_{и}$ при различных $\varepsilon$.

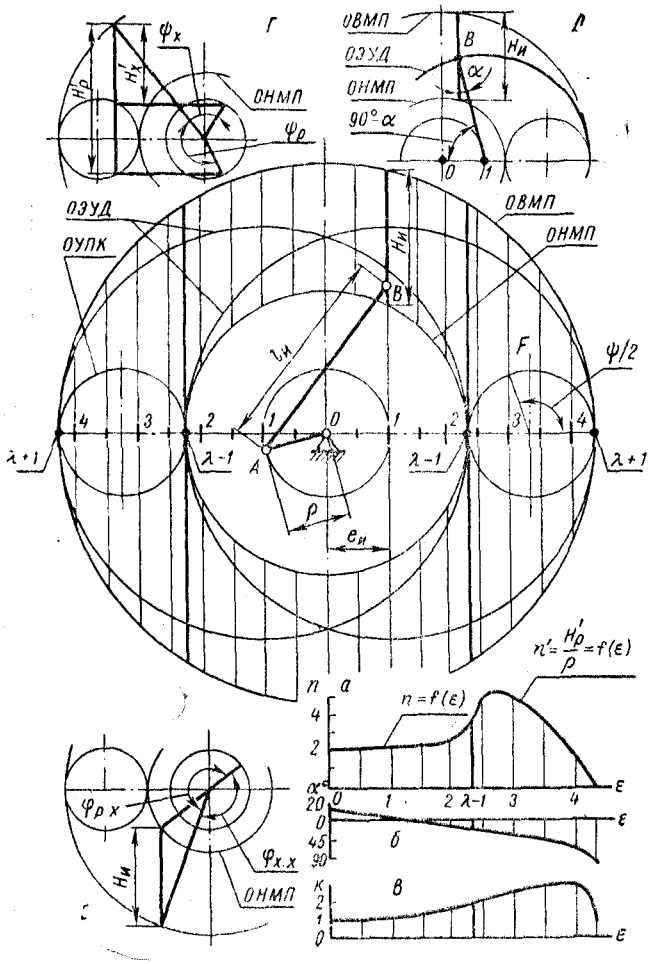


Рис. 1. Картина вариаций кривошипно-шатунного механизма для $\lambda=3{,}3$:

*Г* — синтез коромыслового механизма по углу поворота механизма; *Д* — синтез по углу давления; *Е* — синтез по коэффициенту производительности; *а* — изменение коэффициента увеличения хода ползуна; *б* — изменение угла давления; *в* — изменение коэффициента производительности

5. На отрезке оси абсцисс, отсекаемом значениями $\varepsilon=\lambda-1$ и $\varepsilon=\lambda+1$, как на диаметре, строится окружность углов поворота коромысла. На ней будут располагаться точки $B$ различных вариаций коромыслового механизма, находящегося в мертвых положениях при передаче движения от кривошипа к ползуну. Так как шатун в этих положениях при всех $\varepsilon$ параллелен оси абсцисс (рис. 1, *Г*), а точка $A$ его находится на окружности радиуса $\rho$, то точка $B$ находится на окружности того же радиуса (*ОУПК*).

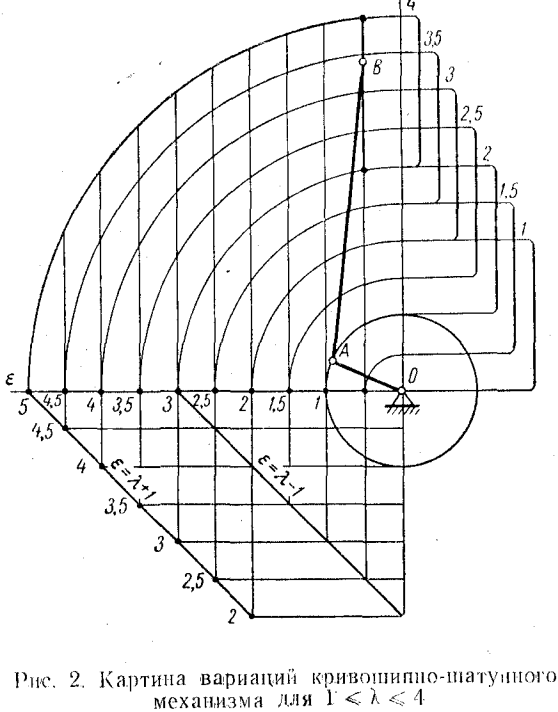


Рис. 2. Картина вариаций кривошипно-шатунного механизма для $1 \leqslant \lambda \leqslant 4$

6. С центром в точке *1* на оси абсцисс проводится окружность экстремальных углов давления радиуса $l_{\text{ш}}$ (*ОЭУД*). Экстремальные значения угла давления (острый угол между шатуном и направлением движения ползуна) получаются, когда кривошип совпадает с осью абсцисс. При таком положении

кривошипа точка $B$ для любых значений $\varepsilon$ будет располагаться на окружности *ОЭУД*.

На рис. 2 показана аналогичная картина вариаций, но выполненная для ограниченного интервала изменений $1 \leqslant \lambda \leqslant 4$, который частично используется в распространенных механизмах. Использование всего интервала изменений $\lambda$ нецелесообразно из-за сложности и малой точности чертежа при $\lambda \to \infty$. Картина строится в том же порядке, что и рис. 1, но окружности *ОВМП* и *ОНМП* наносятся для различных значений $\lambda$ через равные промежутки внутри заданного интервала. Для удобства отыскания окружностей *ОВМП* и *ОНМП*, принадлежащих одному значению $\lambda$, они попарно соединены вертикальными прямыми с обозначением соответствующего значения $\lambda$. При $\lambda = 1$ окружность *ОНМП* превратилась в точку, совпадающую с началом координат.

Шкалы значений $\varepsilon$ нанесены параллельно оси абсцисс для каждого значения $\lambda$. Наклонная прямая, соответствующая значению $\varepsilon = \lambda - 1$, ограничивает область существования механизмов с полным оборотом кривошипа при разных значениях $\lambda$. Так, из рис. 2 видно, что при $\lambda = 1$ полный оборот возможен только при $\varepsilon = 0$, а при $\lambda = 4$ — в интервале $3 \geqslant \varepsilon \geqslant 0$ для всех дезаксиальных механизмов.

Таким образом, на рис. 2 дано наглядное представление условия проворачиваемости кривошипа (1).

Полученные картины вариаций кривошипно-шатунного механизма могут использоваться для решения некоторых практических задач синтеза механизмов.

Задача 1. Синтез кривошипно-шатунного механизма по заданной величине хода ползуна $H$ при известных $\lambda$ и $\varepsilon$.

*Решение.* По рис. 2 находят окружности *ОВМП* и *ОНМП* для данного значения $\lambda$ и на соответствующей горизонтальной шкале заданное значение $\varepsilon$. Отрезок ординаты, проходящий через заданное значение $\varepsilon$, отсекаемый окружностями *ОВМП* и *ОНМП*, является изображением хода ползуна $H_и$ искомого механизма. Переход от изображения к действительным размерам осуществляется по уравнению

$$\frac{H_и}{\rho} = \frac{H}{r}. \tag{5}$$

Обозначим

$$\frac{H_и}{\rho} = n, \tag{6}$$

где $n$ — коэффициент увеличения хода ползуна, являющийся функцией $\varepsilon$.

Получим формулу

$$r = \frac{H}{n}. \tag{7}$$

На рис. 1, *а* функция $n = f(\varepsilon)$ для данного $\lambda$ приведена в виде графика.

Остальные размеры механизма определяются по уравнениям:

$$l = \lambda r, \quad e = \varepsilon r. \tag{8}$$

Задача 2. Синтез кривошипно-шатунного механизма по допускаемому углу давления $\alpha$ во время рабочего хода (рис. 1, *Д*) по заданным $H$, $\alpha$ и $\lambda$.

*Решение.* Из точки $\varepsilon = 1$ проводится прямая под углом $90° - \alpha$ (угол передачи) к оси абсцисс до пересечения с окружностью *ОЭУД*. Абсцисса полученной точки пересечения *В* дает величину $\varepsilon$ искомого механизма. Отрезок вертикальной прямой, проходящей через эту точку и отсекаемый окружностями *ОВМП* и *ОНМП*, изображает ход ползуна искомого механизма. Переход от изображения к натуре осуществляется по уравнениям (7), (8) и (9). С использованием окружности *ОЭУД* построен график (рис. 1, *б*) $\alpha = f(\varepsilon)$, который еще больше упрощает решение задачи. Из рис. 1, *б* видно, что $\alpha$ имеет наименьшее значение $\alpha = 0$ при $\varepsilon = 1$.

Задача 3. Синтез механизма по заданному коэффициенту производительности

$$k = \frac{\varphi_{\text{р. х}}}{\varphi_{\text{х. х}}},$$

где $\varphi_{\text{х. х}}$, $\varphi_{\text{р. х}}$ — углы поворота кривошипа, соответствующие холостому и рабочему ходу механизма, при известных $\lambda$ и $H$.

Углы $\varphi_{\text{х. х}}$, $\varphi_{\text{р. х}}$ определятся по чертежу (рис. 1, *Е*), если провести мертвые положения механизма и по ним строить график $k = f(\varepsilon)$ (рис. 1, *в*).

*Решение.* По графику (рис. 1, *в*) определяется значение $\varepsilon$, соответствующее заданному $k$. Размеры механизма определяются как в задаче 1.

Задача 4. Синтез коромыслового механизма по углу качания коромысла $\psi$ и заданных $\lambda$, $H_{\text{р}}$ (рис. 1, *Г*).

Мертвым положением механизма угол $\psi$ делится на два, названные по аналогии с кривошипным механизмом рабочим углом качения $\psi_р$ и холостым углом качения $\psi_х$. Соответственно этим углам изображение хода ползуна также имеет два участка $H'_р$, $H'_х$ ($H_р$ — рабочий ход ползуна).

*Решение.* Из центра окружности *ОУПК* проводится радиус, составляющий с положительным направлением оси абсцисс угол $\psi/2$ (рис. 1). Абсцисса точки $F$ (пересечения этого радиуса с окружностью *ОУПК*) определяет искомое значение $\varepsilon$. Дальнейшее решение проводится как в задаче 1. Для этого на графике (рис. 1, *а*) в области $\lambda-1<\varepsilon<\lambda+1$ дана функция $n' = \frac{H'_р}{\rho} = f(\varepsilon)$.

Картина вариаций дает наглядное представление об изменении кинематических и динамических характеристик кривошипно-шатунного механизма при изменении его параметров, что позволяет правильно выбрать механизм по заданным характеристикам.

Свойства кривошипно-шатунного механизма в зависимости от $\varepsilon$ при постоянном $\lambda$ изменяются следующим образом.

1. При возрастании $\varepsilon$ увеличивается ход ползуна и коэффициент производительности (рис. 1, *а*, *в*); угол давления во время рабочего хода сначала убывает до $\alpha=0$ при $\varepsilon=1$, а затем возрастает в обратном направлении. Поэтому увеличение хода ползуна или коэффициента производительности рационально в силовых механизмах только до $\varepsilon=1$.

2. Механизм, имеющий $\varepsilon=\lambda-1$, обладает новыми свойствами. В дополнение к имеющимся мертвым положениям при передаче движения от ползуна к кривошипу возникает новое мертвое положение при передаче от кривошипа к ползуну. В этом положении механизм обладает неопределенностью движения, что открывает возможность сконструировать механизм, имеющий ход ползуна, во много раз (более 10 при $\lambda>5$) превосходящий размер кривошипа.

3. При $\varepsilon>\lambda-1$ механизм превращается в коромысловый. Нижнее мертвое положение при передаче от ползуна исчезает. Возникают два новых мертвых положения, соответствующие крайним положениям коромысла. За каждое качение его ползун совершает два хода (прямой и обратный) неравной длины. Такие механизмы можно использовать для увеличения усилий при передаче от ползуна к кривошипу.

Изменение свойств механизмов при изменении $\lambda$ можно проследить по рис. 2.

При $\lambda=1$ и $\varepsilon=\lambda-1=0$ механизм сохраняет все свойства, характерные для механизмов с $\varepsilon=\lambda-1\neq 0$ и указанные в пункте 2. Возможный ход ползуна составляет четыре радиуса кривошипа.

При $\varepsilon>0$ свойства механизма аналогичны изложенным в пункте 3.

Полный оборот кривошипа возможен только при $\varepsilon=0$.

При увеличении $\lambda$ возрастает диапазон существования дезаксиальных кривошипно-шатунных механизмов, а вместе с тем расширяются кинематические возможности механизма.