

---

---

# Прикладные задачи, решаемые антенной техникой

---

---

УДК 621.396.6

## Проектирование механических устройств сканирования антенн с электроприводами малой мощности (часть I)

© Авторы, 2012

**И. Ю. Григорьев** – докторант, к.т.н., НИУ ВШЭ МИЭМ

**В. А. Васин** – к.т.н., НИУ ВШЭ МИЭМ

**Е. Н. Ивашов** – д.т.н., НИУ ВШЭ МИЭМ

**С. В. Степанчиков** – к.т.н., НИУ ВШЭ МИЭМ

E-mail: ienmiem@mail.ru, vacuumwa@list.ru, vacuumwa@ya.ru

---

Проанализированы устройства сканирования антенн, которые позволяют осуществлять возвратно-вращательное (сканирующее) движение исполнительного элемента электромеханического привода. Приведены основные особенности подобных устройств, позволяющие выбрать оптимальный тип устройства и рассмотрены основы их проектирования.

**Ключевые слова:** устройства сканирования антенн, электромеханический привод, возвратно-вращательное движение, радиолокационная станция, передаточные механизмы.

Analyzed a variety of mechanical scanning device antennas, which allow for back-rotation (scan) the motion of the actuator electromechanical actuator. The basic features of such devices, allowing you to select the optimum type of device and the basics of their design.

**Keywords:** antenna scanning mechanisms, electromechanical actuator reciprocating rotary motion, mobile radar station, transmission gears.

**Введение.** Независимо от формы и назначения большинство радиолокационных станций (РЛС) имеют схожие составные части: антенный блок, электронные и индикаторный блоки. По последнему оценивается положение цели.

Приводные механизмы (приводы) обеспечивают антенне при обзоре определенное движение. Они бывают различных типов: электрические, электромеханические, гидравлические и др.

Выбор типа привода определяет ряд факторов: назначение станции, ее характеристики, объект, на котором она устанавливается, степень стабилизации, допустимый вес, потребляемая мощность и т.д. [1]

В статье рассматривается только электромеханический привод. В качестве передаточных механизмов в нем используются зубчатые передачи различных видов, планетарные, волновые, кулачковые и др. Червячные передачи используются реже по сравнению с зубчатыми ввиду низкого КПД и повышенной величины мертвого хода.

Так как приводы антенн обычно работают в системе реверса и управляются вспомогательными механизмами, то к передаточным механизмам

приводов предъявляется требование ограниченного мертвого хода, величина которого определяется зазорами в кинематических парах механизма. При этом следует учитывать работу привода в широком диапазоне рабочих температур, часто при различных материалах корпуса и деталей передачи.

В радиолокационных станциях обзора антенна используется для наблюдения за пространством в пределах заданной зоны; схема привода такой РЛС обычно состоит из:

а) программного устройства;

б) приводов азимута, угла места (наклона) и стабилизации основания.

Программное устройство при строчном обзоре осуществляет реверсирование антенны по азимуту и переход от одной строки к другой по углу места. Возможны различные виды программных устройств. В одном из них управление приводами азимута и угла места (реверсирование или переход от одной строки к другой) производится через фиксированные промежутки времени, которые задаются электронными схемами. Применяются также схемы реверса с использованием электро-

магнитных порошковых муфт и переключателей реверса, срабатывающих в задаваемых крайних положениях антенны.

Основным требованием к приводам азимута и угла места является обеспечение необходимой скорости обзора и времени реверса в заданных пределах.

В системах сканирования (обзора) различных средств наблюдения и контроля возникает задача создания электромеханического привода, имеющего мощность до 600 Вт, обеспечивающего возвратно-вращательное движение исполнительного элемента [2]. В этом случае структура механических составляющих электропривода имеет вид, показанный на рис. 1. Здесь важным элементом электропривода является механизм сканирования, который обеспечивает преобразование однонаправленного вращения входного звена в требуемое возвратно-вращательное движение выходного звена (исполнительного элемента). В таких приводах редуктор может применяться как для согласования скорости вращения вала электродвигателя и входного звена, так и для получения выигрыша по вращающему моменту на входном звене. Целью рассмотрения будет именно механизм сканирования (рис. 2). При этом представляют интерес выбор конструкции механизма, анализ его кинематики и динамики.

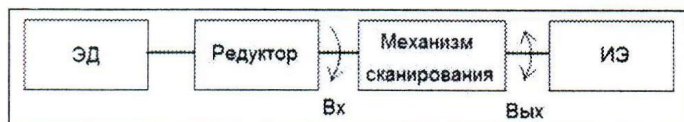


Рис. 1. Структура сканирующего электропривода (ЭД – электродвигатель, ИЭ – исполнительный элемент)



Рис. 2. Схема устройства сканирования

При исследовании кинематики и динамики механизмов удобно скорости и ускорения звеньев (и их точек) выражать в зависимости от координаты (линейной или угловой) входного звена. Например, если есть функция положения механизма  $\Psi(\varphi)$  – зависимость угла поворота выходного звена –  $\Psi$  от угла поворота входного звена –  $\varphi$ , то угловая скорость выходного звена в любой момент времени может быть представлена в следующем виде:

$$\omega_{\text{вых}}(t) = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d\Psi}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = \Psi' \omega_{\text{вх}},$$

где  $\Psi'$  – безразмерная величина, которую называют аналогом угловой скорости выходного звена;  $\omega_{\text{вх}}$  – угловая скорость входного звена, рад/с.

Если учесть, что в большинстве механизмов входное звено вращается равномерно  $\omega_{\text{вх}} = \text{const}(t)$ , то зависимость  $\Psi'(\varphi)$  позволяет оценить изменение скорости выходного звена от времени.

Аналогично, угловое ускорение выходного звена

$$\begin{aligned} \epsilon_{\text{вых}}(t) &= \frac{d\omega_{\text{вых}}}{dt} = \frac{d}{dt}(\Psi' \omega_{\text{вх}}) = \\ &= \omega_{\text{вх}} \frac{d\Psi'}{dt} + \Psi' \frac{d\omega_{\text{вх}}}{dt} = \\ &= \omega_{\text{вх}} \frac{d\Psi'}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} + \Psi' \epsilon_{\text{вх}} = \Psi'' \omega_{\text{вх}}^2 + \Psi' \epsilon_{\text{вх}}, \end{aligned}$$

где  $\epsilon_{\text{вх}}$  – угловое ускорение входного звена, рад/с<sup>2</sup>;  $\Psi''$  – безразмерная величина, которую называют аналогом углового ускорения выходного звена.

Теоретически, с помощью сканирующего механизма можно получать самые различные законы движения выходного звена, но на практике используют только такие, которые обладают легкостью получения и удовлетворяют кинематическим и динамическим требованиям.

В общем виде функция положения для сканирующего механизма может быть представлена графиком, показанным на рис. 3.

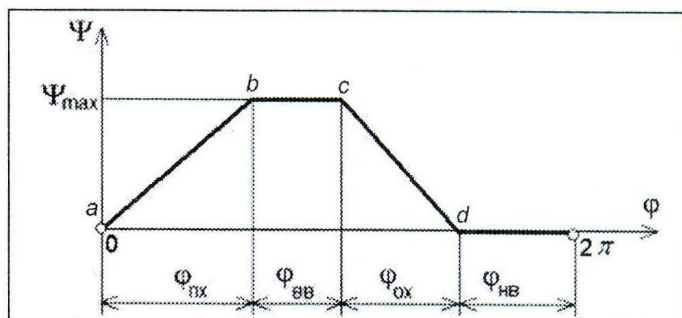


Рис. 3. Функция положения сканирующего механизма в общем виде

На этом графике  $\varphi_{\text{пх}}$ ,  $\varphi_{\text{ох}}$ ,  $\varphi_{\text{вв}}$ ,  $\varphi_{\text{нв}}$  – соответственно углы прямого хода, обратного хода, верхнего выстоя и нижнего выстоя выходного звена; суммы этих углов определяют полный оборот входного звена вокруг своей оси. В системах сканирования обычно  $\varphi_{\text{вв}} = \varphi_{\text{нв}}$  и эти углы стараются сделать минимально возможными. Для технологического оборудования, где имеются медленный рабочий ход и быстрый холостой ход исполнительного элемента, часто делают так, чтобы  $\varphi_{\text{пх}} > \varphi_{\text{ох}}$ . Для систем обзора – симметричный цикл:  $\varphi_{\text{пх}} = \varphi_{\text{ох}}$ .

Если функция положения на участках  $a-b$  и  $c-d$  будет линейной, то скорость выходного звена на этих участках постоянна. На рис. 4 показаны графики функции положения и аналога скорости для этого случая. Из графика аналога скорости видно, что в точках  $a, b, c, d$  возникают очень большие ускорения выходного звена (их реальная величина определяется жесткостью звеньев). Следствием этого является возникновение ударных нагрузок в механизме, что снижает его надежность и повышает износ кинематических пар.

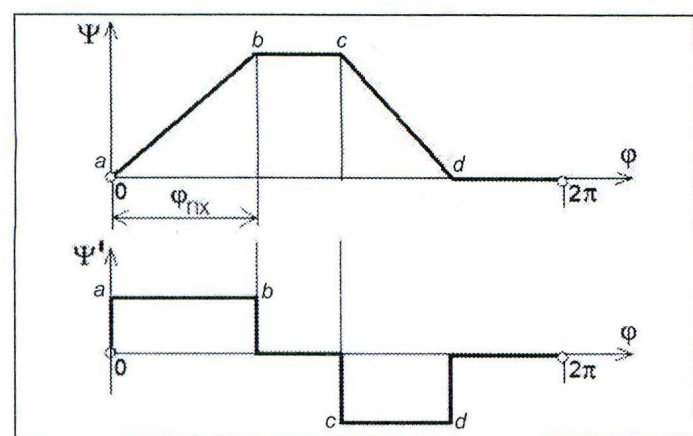


Рис. 4. Функция положения с линейными участками прямого и обратного хода

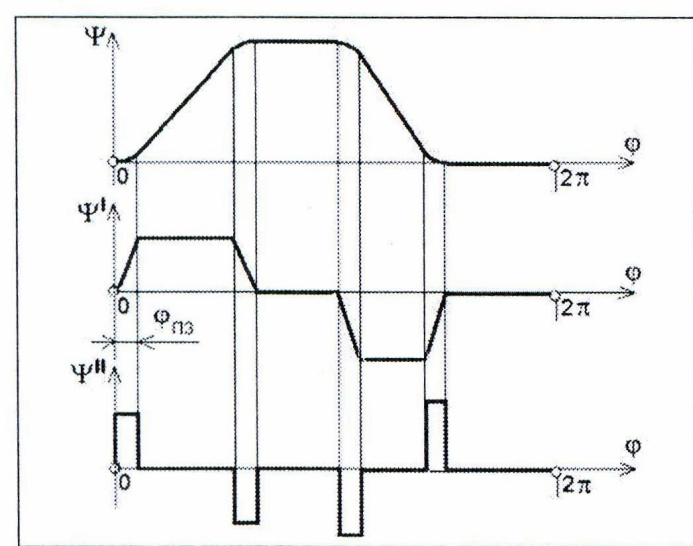


Рис. 5. Функция положения со смягчением ударных нагрузок

Для смягчения ударов в районе точек  $a, b, c, d$  делают переходные зоны  $\varphi_{пз} \approx 0,15\varphi_{пх}$  (рис. 5), которые смягчают ударные нагрузки и позволяют решить эту проблему для тихоходных механизмов.

В положениях выходного звена (исполнительного элемента), где оно движется с ускорением  $\varepsilon_{из}$ , на него действуют моменты сил инерции

$$M_{дин} = J_{из} \varepsilon_{из},$$

где  $J_{из}$  – момент инерции исполнительного элемента.

Избежать сильных ударных нагрузок, что является весьма важным для быстроходных механизмов, можно при использовании треугольной (или синусоидальной) формы графика аналога ускорений (рис. 6).

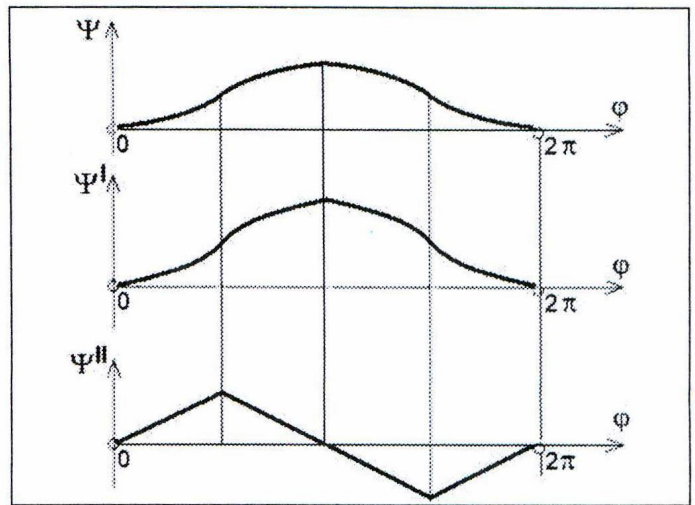


Рис. 6. Функция положения с малыми ударными нагрузками

**Кривошипные плоские механизмы.** Кривошип – вращающееся звено рычажного механизма, которое может совершать полный оборот вокруг неподвижной оси (рис. 7,а). Типовая конструкция кривошипа показана на рис. 7,б. Вращательную пару  $B$  (скольжения или качения) рекомендуется сделать сферической для компенсации перекосов осей звеньев. Часто кривошип конструктивно объединяют с маховиком, что позволяет уменьшить дисбаланс входного звена и уменьшить динамические инерционные нагрузки в механизме. Иногда кривошип выполняют как эксцентрик (рис. 7,в,г) – для снижения давления в узлах трения, что позволяет уменьшить их износ. Для передачи значительных нагрузок и получения высокой жесткости кривошипа его выполняют в форме коленчатого вала (рис. 7,д).

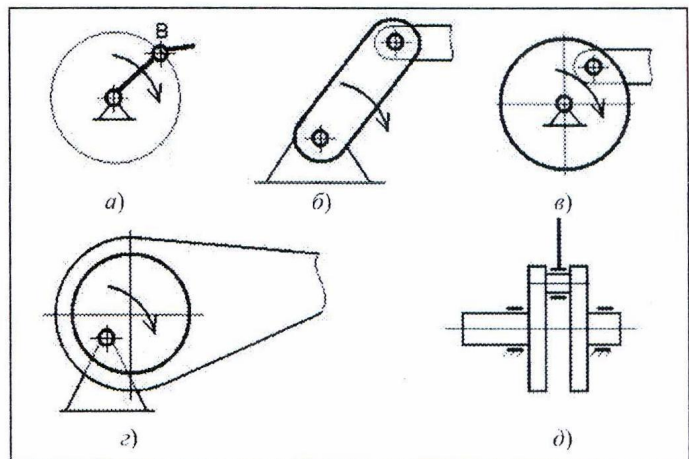


Рис. 7. Схема (а) и конструкции кривошипа (б–д)

Кривошип, установленный на выходной вал редуктора или непосредственно на вал электродвигателя, является основой для двух типов плоских механизмов, позволяющих при равномерном однонаправленном движении вала двигателя получить возвратно-вращательное движение выходного звена: кривошипно-кулисные механизмы, кривошипно-коромысловые механизмы.

Ниже будут рассмотрены особенности этих механизмов.

**Кривошипно-кулисные плоские механизмы.** Кулиса – звено рычажного механизма, вращающееся вокруг неподвижной оси и образующее с другим подвижным звеном поступательную пару (рис. 8).

Конструкции кулис показаны на рис. 9. Охватывающая кулиса может быть с прямоугольной ползушкой (рис. 9,а) или цилиндрической (трубчатой), что является довольно удобным в механизмах с использованием гидравлических или пневматических устройств (рис. 9,б). Охватываемая кулиса показана на рис. 9,в.

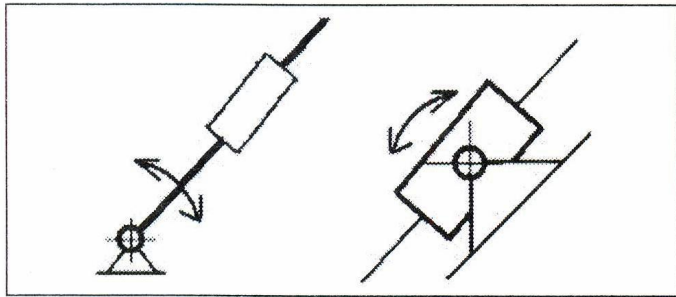


Рис. 8. Схемы кулис

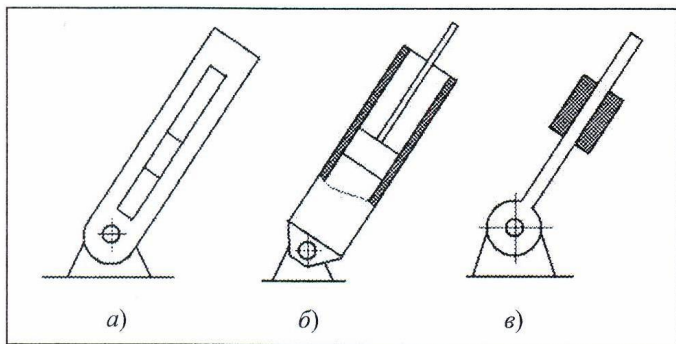


Рис. 9. Конструкции кулис

Кривошипно-кулисный механизм и план скоростей для него в выделенном положении представлены на рис. 10. В положениях МТ1 и МТ2 – «мертвых точках» – наблюдается остановка кулисы. Из рисунка видно, что:

$$\Psi_{\max} = \arcsin\left(\frac{AB}{AC}\right);$$

$$\varphi_{\text{MT1}} = \frac{\pi}{2} + \Psi_{\max}; \quad \varphi_{\text{MT2}} = 2\pi - \varphi_{\text{MT1}}.$$

Важным преимуществом такого механизма является его компактность и простота конструкции. Прямой и обратный ход кулисы неодинаковы, поэтому рабочий ход (медленный) делают на участке от МТ2 до МТ1, а холостой ход (быстрый) на участке от МТ1 до МТ2. Кулиса здесь движется неравномерно. Примерный вид функции положения для изображенного на рис. 10 механизма показан на рис. 11.

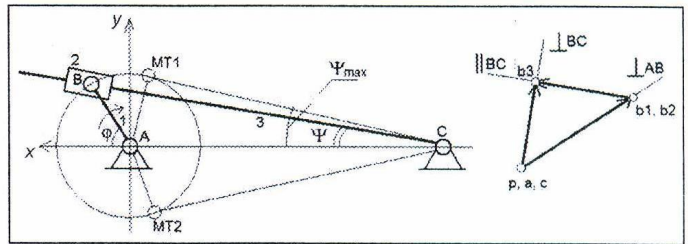


Рис. 10. Кривошипно-кулисный механизм

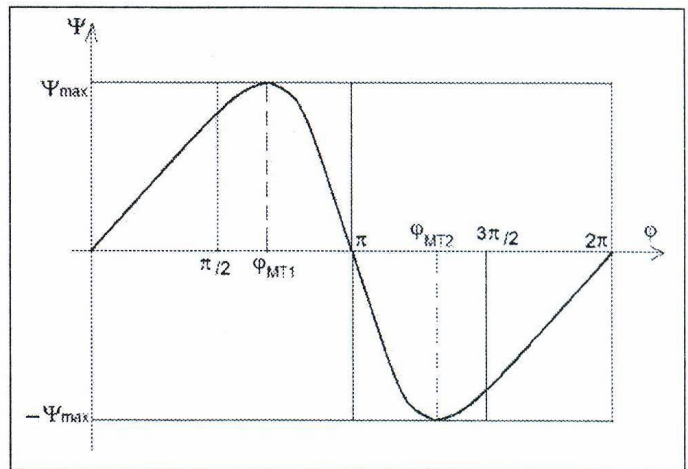


Рис. 11. Функция положения кривошипно-кулисного механизма

Выполним аналитический расчет кинематики такого механизма. Рассмотрим треугольник АВС. В проекциях на оси координат  $x$  и  $y$  получим уравнения на ось  $x$

$$AB\cos\varphi + AC = BC\cos\Psi, \tag{1}$$

на ось  $y$

$$AB\sin\varphi = BC\sin\Psi. \tag{2}$$

При делении (2) на (1) получим

$$\operatorname{tg}\Psi = \frac{AB\sin\varphi}{AC + AB\cos\varphi},$$

и функция положения будет

$$\Psi = \operatorname{arctg}\left(\frac{AB\sin\varphi}{AC + AB\cos\varphi}\right).$$

Если продифференцировать уравнение (2) по координате  $\varphi$ , то получим

$$AB\cos\varphi = \frac{dBC}{d\varphi}\sin\Psi + BC\cos\Psi\Psi'.$$

Из углов этого уравнения вычтем угол  $\Psi$  (т.е. применим метод обращения движения, о котором подробнее изложено ниже):

$$AB \cos(\varphi - \Psi) = BC \Psi',$$

откуда аналог скорости выходного звена (кулисы) будет

$$\Psi' = \frac{AB}{BC} \cos(\varphi - \Psi).$$

**Кривошипно-коромысловые плоские механизмы.** Коромысло – вращающееся звено рычажного механизма, которое может совершать только неполный оборот вокруг неподвижной оси (рис. 12).

В общем виде кривошипно-коромысловый механизм выглядит, как показано на рис. 13. При равномерном вращении кривошипа  $AB$  коромысло  $CD$  совершает неравномерные качания относительно точки  $D$ .

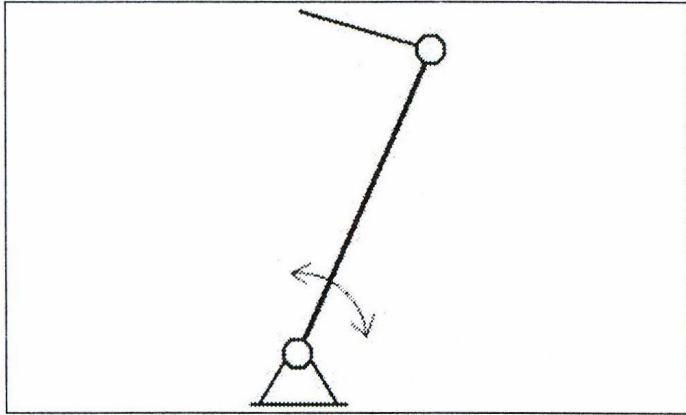


Рис. 12. Схема коромысла

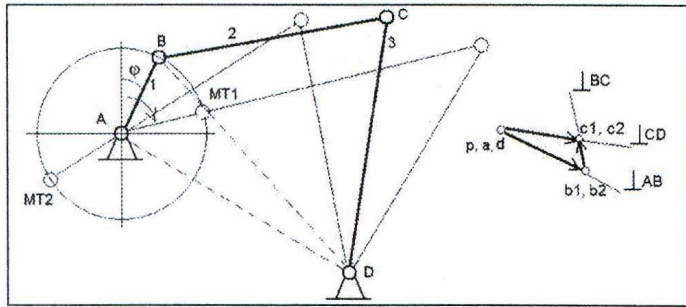


Рис. 13. Кривошипно-коромысловый механизм

Представляют интерес два частных вида кривошипно-коромысловых механизмов.

В механизме, показанном на рис. 14, за половину оборота кривошипа коромысло совершает полное качание в одну сторону. Амплитуда качания коромысла

$$\Psi_{\max} = \arcsin\left(\frac{AB}{CD}\right).$$

Функция положения показана на рис. 15. Из графика функции положения механизма видно,

что качания коромысла в одну и в другую стороны почти идентичны (особенно, если длина кривошипа  $AB$  мала по сравнению с  $BC$  и  $CD$ ).

В механизме, показанном на рис. 16, обеспечены симметричные качания коромысла относительно линии  $AD$ . Здесь  $AB = BC, AD = CD$ .

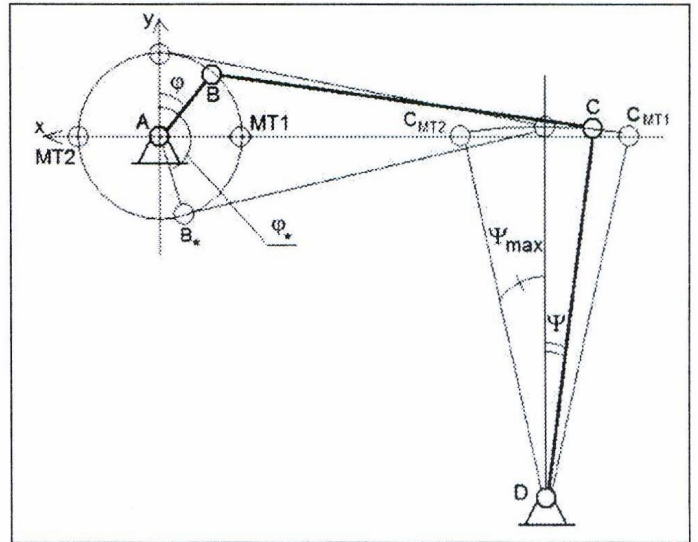


Рис. 14. Пример кривошипно-коромыслового механизма

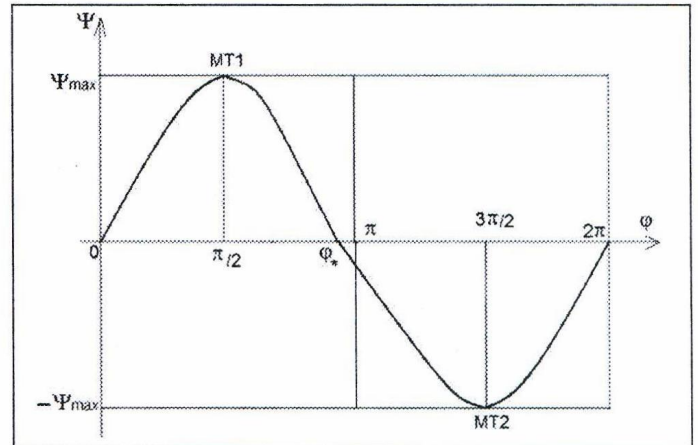


Рис. 15. Функция положения для механизма, представленного на рис. 14

Амплитуда качания коромысла

$$\Psi_{\max} = 2 \arcsin\left(\frac{AB}{CD}\right).$$

Угловая координата кривошипа, соответствующая мертвым точкам, будет такой:

$$\varphi_{MT1} = \frac{\pi}{2} + 0,5\Psi_{\max}, \quad \varphi_{MT2} = 2\pi - \varphi_{MT1}.$$

Из графика функции положения механизма (рис. 17) видно, что скорость качания коромысла при движении в одну сторону (от  $MT2$  до  $MT1$ ) меньше, чем в другую сторону (от  $MT1$  до  $MT2$ ), т.е. по кинематике он близок к кривошипно-кулисному механизму. Данный механизм имеет один существенный

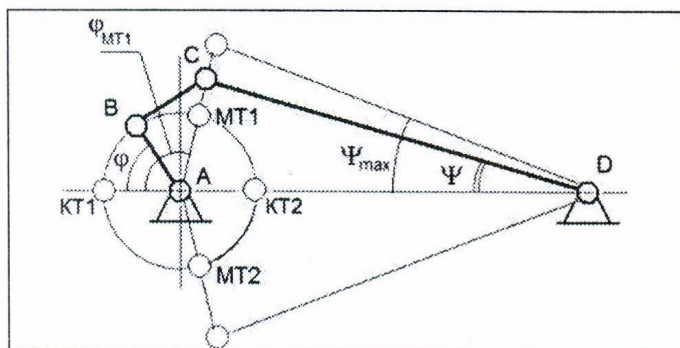


Рис. 16. Пример кривошипно-коромыслового механизма

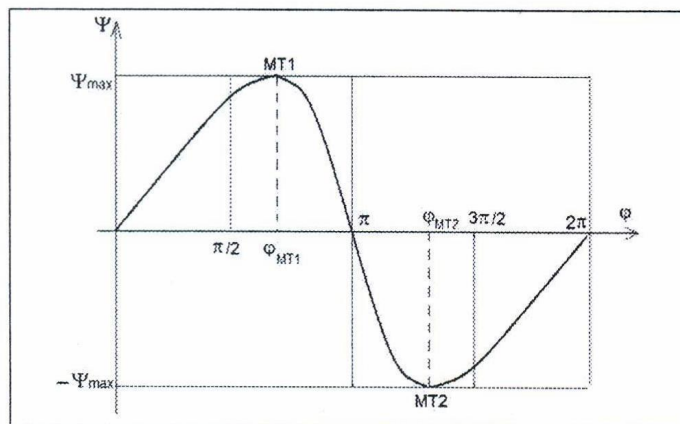


Рис. 17. Функция положения для механизма, представленного на рис. 16

недостаток: в положениях, близких к точкам КТ1 и КТ2, когда угол между кривошипом и шатуном весьма мал (а в крайних точках – равен нулю), возникают очень большие усилия в шарнире В, которые могут привести к быстрому износу или поломке вращательной пары в шарнире.

Аналитический анализ кинематики кривошипно-коромыслового механизма (см.рис. 13) можно выполнить, рассматривая сначала треугольник  $ABD$  (определить зависимость  $BD$  как функцию угловой координаты кривошипа), а затем треугольник  $BDC$  с использованием известных теорем планиметрии: теорем косинусов и синусов. В результате будет получена вычисляемая с большой точностью функция положения механизма. Подробно этот метод изложен в [3].

## Design of antenna mechanical scanning devices with low-power electric

© Authors, 2012

I. Yu. Grigoriev, V. A. Vasin, E. N. Ivashov, S. V. Stepanchikov

The questions of design of mechanical devices scanning antenna with a low power electromechanical actuators that are based on flat crank, crank-rocker, rocker-crank, cam-rocker and other mechanisms. They allow you to back-rotation (scan) the motion of the actuator drive. Peculiarities created devices that allow you to choose the optimal type and address their basic design.

Noted that the actuator that performs the scanning function, it can be much smaller, if at the expense of management to ensure rapid and reliable reversal of the rotor of the electric motor during its operation.

Рассмотрим группу: шатун + коромысло (рис. 18). На коромысло со стороны шатуна действует сила  $F_3$ . Движение коромысла осуществляется за счет действия составляющей этой силы:  $F_T = F_3 \cos \nu$ , где угол  $\nu$  – называют углом давления. Другая составляющая  $F_N = F_3 \sin \nu$  является не только бесполезной, но и вредной, так как дополнительно нагружает шарниры и вызывает их износ. При проектировании механизмов стараются, чтобы угол давления был по возможности небольшим:  $\nu_{\max} \approx 45^\circ$ . Обычно условие  $\nu \leq \nu_{\max}$  проверяют, когда кривошип находится вблизи мертвых точек.

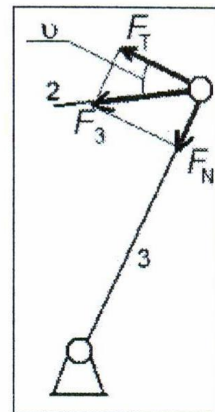


Рис. 18. Распределение сил, действующих на коромысло со стороны шатуна

- Механические устройства сканирования антенн с электромеханическими приводами малой мощности, построенные на основе кривошипных плоских, кривошипно-кулисных, кривошипно-коромысловых, кулачково-коромысловых и др. механизмов, позволяют осуществлять возвратно-вращательное (сканирующее) движение исполнительного элемента привода. Приведены особенности создаваемых устройств, позволяющие выбирать оптимальный тип, и рассмотрены их основы проектирования. Электропривод, выполняющий сканирующие функции, можно сделать намного компактнее, если за счет системы управления обеспечить быстрое и надёжное реверсирование ротора электродвигателя в процессе его работы.

### Литература

1. Роцин Г.И. Конструирование механизмов радиоэлектронной аппаратуры. М.: Высшая школа. 1983. С. 329–334.
2. Роцин Г.И. Несущие конструкции и механизмы РЭА. М.: Высшая школа. 1981.
3. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1988.

Поступила 16 февраля 2012 г.