УДК 621

О ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВАХ ЭПИЦИКЛОИДЫ И ГИПОЦИКЛОИДЫ В ПРИМЕНЕНИИ К МЕХАНИЧЕСКИМ ПЕРЕДАЧАМ

© Олег Гильмуллович Мугин, Олег Олегович Мугин, Александр Владимирович Синев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук
olegmugin@rambler.ru

Аннотация.*: В статье рассматриваются аспекты исторического развития и эволюции цевочных передач с момента создания и по сей день, теоретические основы для расчета механических циклоидальных механизмов.*

Ключевые слова*: Циклоидальные механизмы, цевочные передачи, приводы.*

Abstract.: *The article discusses aspects of historical development and evolution of the pin gear from the inception to the present day, the theoretical basis for calculating the mechanical cycloidal gearingh*

Keywords: *Cycloidal gearing, pin gear, gear.*

Замечательные свойства циклоидальных кривых-эпициклоиды и гипоциклоиды привлекали внимание ещё древнегреческих математиков и астрономов до нашей эры. Затем этот вопрос изучали средневековые арабские математики. Уже в Новое время эти кривые изучали Николай Коперник, Альбрехт Дюрер, а в 18 веке И.Ньютон, Г.Лейбниц. Л. Эйлер и Д.Бернулли. Вопрос об использовании этих кривых для механических передач поднимался в 17 веке Ж. Дезаргом и Де ла Гиром, но развитие машиностроительной техники пошло по другому пути.

На протяжении всей истории редукторо- и приводостроения производились основном классические зубчатые редукторы: цилиндрические, конические, планетарные, червячные, волновые и различные комбинации этих схем. В основе конструкции таких редукторов и мультипликаторов лежит точечный контакт между взаимодействующими телами через зубья, представляемый в российской школе теории механизмов и машин как пары четвёртого класса[1]. Особенности геометрии поверхностей контактного взаимодействия позволяют в первую очередь говорить об эвольвентных цилиндрических и конических поверхностях как наиболее освоенных технологически. Прогрессивным направлением считается геометрия поверхности зубьев зацепления, называемого зацеплением Новикова[2].

В последние годы широкое распространение получают так называемые планетарно-цевочные передачи как альтернативные традиционным зубчатым передачам [3,4]. Впервые подобную передачу запатентовал в 1931 году немецкий инженер Лоренц Брарен. Использование циклоидальных зацеплений представляет таким редукторам и мультипликаторам ряд преимуществ по сравнению с эвольвентным зацеплением. Эти передачи обладают при сравнении с зубчатыми передачами уменьшенными объёмами и габаритами, меньшей массой, повышенной несущей способностью и долговечностью вследствие многконтактности зацепления. Идея конструкции этих передач заключается в обкатывании телами качения-роликами специально профилированных поверхностей двух тел. Передачи позволяют получить максимальное передаточное отношение в одной ступени

до 500. Коэффициент полезного действия таких редукторов составляет 85-97%. и они выдерживают пятикратные перегрузки. Взаимодействие твёрдых тел, передающих движение от входного вала к выходному, происходит через подшипники качения. Поэтому использование этих передач в режиме мультипликаторов там, где это необходимо, является предпочтительным.

Планетарно-цевочные редукторы быстро распространяются по всему миру. По информации основного японского производителя-корпорации SUMITOMO-CYCLO применимость таких редукторов достигла 30% в США и 60% в Японии и Южной Корее. Они используются в робототехнике, станкостроении, химическом машиностроении, грузоподъёмных машинах, цепных конвейерах, радиолокаторах, экскаваторах и буровом оборудовании. Важной эксплуатационной характеристикой передачи является пониженный уровень шума и вибраций.

Хотя термин «планенарно-цевочное зацепление»[5] некоторым образом перекликается с термином «зубчатое зацепление», на наш взгляд, геометрия этих передач принципиально отличается от геометрии зубчатых зацеплений. Рассмотрим схему построения одной ступени такой передачи, отталкиваясь от уравнений циклоидальных кривых, записанных в параметрической форме[6].

Для удобства дальнейших выкладок целесообразно воспользоваться векторной формой записи в плоскости XY.

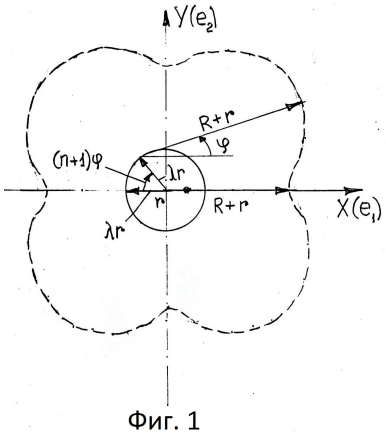
Уравнение эпициклоиды.

$$[(R+r)\,\mathrm{Cos}\varphi-\lambda r\,\mathrm{Cos}((R/r)+1)\,\varphi]\mathbf{e_1}+[(R+r)\,\mathrm{Sin}\varphi-\lambda r\,\mathrm{Sin}((R/r)+1)\,\varphi]\mathbf{e_2} \quad (1)$$

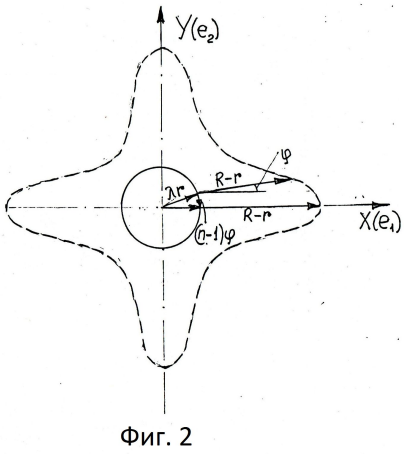
Уравнение гипоциклоиды

$$[(R-r)\,\mathrm{Cos}\varphi+\lambda r\,\mathrm{Cos}((R/r)-1)\,\varphi]\mathbf{e_1}+[(R-r)\,\mathrm{Sin}\varphi+\lambda r\,\mathrm{Sin}((R/r)-1)\,\varphi]\mathbf{e_2} \quad (2)$$

В приведенных выше формулах: $\mathbf{e_1}$-единичный вектор, сориентированный по оси X, $\mathbf{e_2}$-единичный вектор, сориентированный по оси У, φ-угол поворота текущего вектора относительно оси X, R –радиус неподвижного круга, r- радиус подвижного круга, λ≤1-коэффициент укорочения эпициклоиды или гипоциклоиды. Обозначим (R/r)=n. Рассмотрим в качестве примера построение эпициклоиды (фиг.1) и гипоциклоиды (фиг.2) для случая n=4, λ=0,6 в соответствии с формулами (1) и (2). На фиг.1 и 2 показаны вращающиеся векторы $\lambda\mathbf{r}$ и $\mathbf{R+r}$.и вид получаемых эпициклоиды и гипоциклоиды.



Фиг. 1



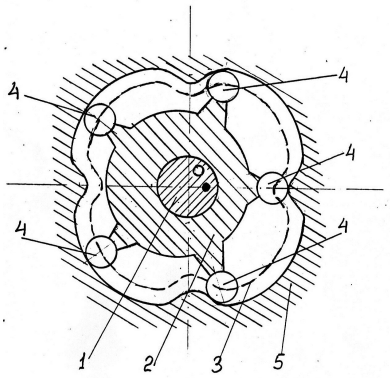
Фиг. 2

Фиг.1.Укороченная эпициклоида. (R/r)=n=4. λ =0,6.

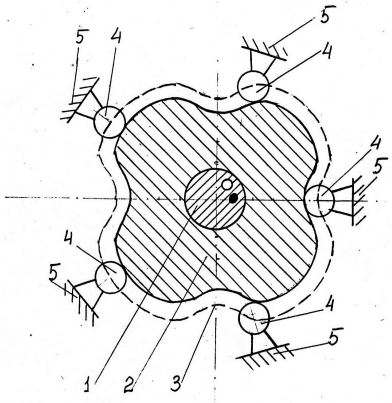
Фиг.2. Укороченная гипоциклоида. (R/r)=n=4. λ =0,6.

Задача построения механической передачи заключается в в организации движения системы тел таким образом, чтобы быстрое вращение с углом nφ входного

эксцентрикового вала передалось через круглую цилиндрическую поверхность другому телу, которое взаимодействует с системой роликов, расположенных вокруг этого тела и вращается с углом φ. В зависимости от расположения роликов это тело может выполнено в двух вариантах. Первый вариант носит название сепаратора (фиг3), второй вариант сателлита (фиг.4 для эпициклоидальной передачи, фиг.5 для гипоциклоидальной передачи).



Фиг3.Эпициклоидальная передача с сепаратором.

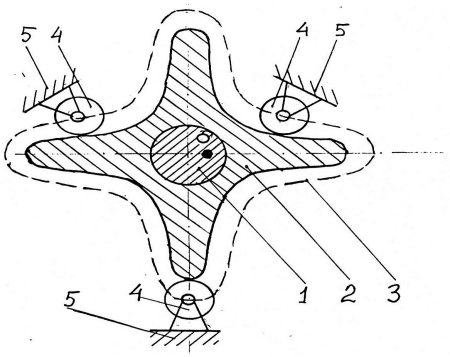


Фиг 4.Эпициклоидальная передача с сателлитом.

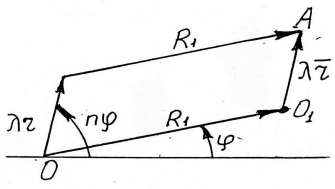
где для Фиг. 3 -Входной вал. 2-Сепаратор. 3-Формирующая эпициклоида. 4-Ролики. 5-Профилированная поверхность корпуса.
где для Фиг. 4: 1 -Входной вал. 2- Профилированный сателлит. 3-Формирующая эпициклоида. 4-Ролики. 5- Крепление роликов на кронштейнах к корпусу.

Оси роликов равномерно распределены, по углу φ по эпициклоиде или гипоциклоиде, показанных на фиг 3,4,5 пунктиром. В случае сепаратора ролики закреплены на нём и их оси двигаются по эпициклоиде при вращении с углом φ. Происходит их обкатка по неподвижной внешней профилированной поверхности. В случае сателлита (фиг.4 и 5) ролики закреплены неподвижно и вращается с углом φ профилированный сателлит. Для понимания механики движения важно, что обкатывание роликов по неподвижной направляющей в случае сепаратора и обкатывание сателлита относительно неподвижных роликов с углом φ побуждается вращением эксцентрика с углом nφ. Число роликов должно быть равным n+1 для эпициклоиды и n-1 для гипоциклоиды (то есть в нашем примере на фиг. 3-5 это значения **5** и **3**). Таким образом пунктирные линии на фиг. 3-5 воспроизводят кривые фиг. 1 и 2 по формулам (1) и (2) и при этом формируется относительное движение эксцентрикового вала и сепаратора (сателлита).
Сепаратор (или сателлит) совершают сложное плоское движение. На вращение тела по φ вокруг оси вращения входного вала точки О накладывается плоскопараллельное поступательное движение, при котором каждая точка плоскости сепаратора (сателлита) двигается по окружности с радиусом λr с углом вращения nφ. Необходим механизм, который превратит движение сепаратора (сателлита) во вращение выходного вала по φ вокруг оси, соосной оси вращения входного вала (точки О). Определим как происходит относительное движение произвольной точки А на сепараторе (сателлите) с радиусом $R_1 \leq R$ относительно положения точки O_1 на выходном валу, когда векторы $\mathbf{R}_1$ на сепараторе (сателлите) и на выходном валу находятся под одним углом φ.(фиг.6) Вектор разности между токами А и O_1 равен
$\lambda\mathbf{r} + \mathbf{R} - \mathbf{R}_1 = \lambda\mathbf{r}$ (3),
Определим косинус между вектором разности и вектором вала , вычислив векторное скалярное произведение.
$\lambda\mathbf{r}\,\mathbf{R}_1 = \lambda r R_1[\cos\varphi \cdot \cos(n+1)\varphi + \sin\varphi \cdot \sin(n+1)\varphi] = \lambda r R_1 \cos n\varphi$ (4).

Таким образом произвольная точка А на сепараторе (сателлите) n раз делает оборот вокруг точки O_1,выходного вала, что даёт возможность разместить между сепаратором (сателлитом) и выходным валом произвольное число механизмов. Эти механизмы назовём эксцентриковыми.



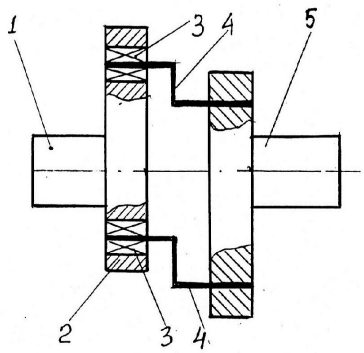
Фиг.5 Гипоциклоидальная передача с сателлитом.



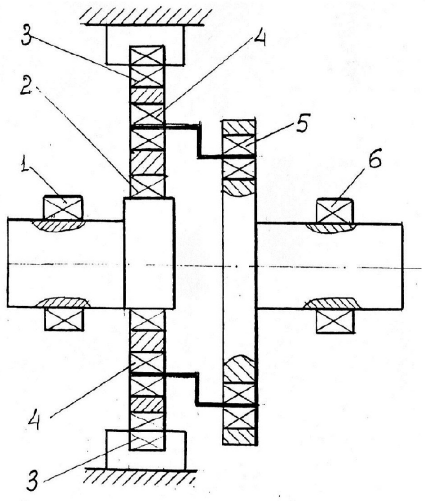
Фиг.6. Векторная диаграмма для определения относмительного движения точки А на сепараторе (сателлите) относительно точки О на выходном валу.

Схема передачи движения на выходной вал показана на фиг.7.

На фиг.8 представлена общая схема передачи с подшипниками качения между всеми взаимодействующими в системе телами для случая сателлита. Входной вал опирается на подшипник качения 1. Эксцентрик входного вала и сателлит разделены подшипником качения 2. Оси и обоймы неподвижных роликов, по которым обкатывается сателлит, разделены подшипниками качения 3. Коленчатые оси соединяют кривошип сателлит и выходной вал. На сателлите закреплены оси на эксцентриковых подшипниках качения 4, на фланце выходного вала оси на обычных подшипниках качения 5. Выходной вал, соосный с входным, опирается на подшипник качения 6.



Фиг.7. Схема передачи вращения с сателлита на выходной вал.



Фиг.8. Расположение подшипниковых узлов качения в передаче.

Таким образом, взаимные движения с редукцией или мультипликацией происходят только через подшипники качения. Это обстоятельство, как указывалось выше, обеспечивает высокий коэффициент полезного действия передачи. Рассматриваемая новая область теории механических передач требует более углубленных теоретических кинетостатических, а также экспериментальных исследований вновь создаваемых передач.

Заключение.

Рассмотренные механические передачи принципиально отличаются от обычных передач с зубчатыми зацеплениями. На основе использования замечательных свойств плоских кривых: эпициклоиды и гипоциклоиды - создаются новые механические передачи (редукторы и мультипликаторы), обладающие меньшими размерами, пониженным уровнем шума и высокими передаточными отношениями (до 500) в одной ступени.

Литература

1. Фролов К.В, Попов С.А., Мусатов А.К.. Теория механизмов и машин. Под ред. К.В. Фролова. М.Высшая школа , 1987-496 с. Учебник.
2. Крайнев А.Ф. Механика машин. Фундаментальный словарь. М. Машиностроение. 2001.
3. Киреев С.О. Теоретические основы методов анализа и синтеза планетарных механизмов с внецентроидным цевочным зацеплением. Диссертация на соискание учёной степени д-ра технических наук. М. ИМАШ РАН.2003, 450с.
4. Фомин М.В. Планетарно-цевочные передачи.М. Изд-во МГТУ им. Баумана.2009 г.62 с.
5. Крайнев А.Ф. Словарь-справочник по механизмам. М.Машиностроение. 1981.560с.
6. Выговский М.Я.И. Справочник по высшей математике. М. АСТ. Астрель. 2006-991.

Поступила: 13.11.12.