

THE SHAPING OF WORKING PROFILE OF CYCLOID PLANETARY PINION.

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОФИЛЯ САТЕЛЛИТА ТРОХОИДНОЙ ПЕРЕДАЧИ.

Dr. Eng. Jankevich M., Ass. Dziatkovich V. National Academy of Science - Minsk, Belarus. E-mail: alexsktb@solo.by

Abstract/Pe310Me: In the article we describe the method of approximation for tooth profile of the cycloidal gear of the cycloid drive. The approximation is executed by adjoint gradient method. Also we propose a shapig of working profile of satellite with the help of special attachment.

KEYWORDS: APPROXIMATION, WORKING PROFILE, CYCLOIDAL GEAR.

1. Introduction / Введение.

Электромеханический привод на основе трохоидной передачи, использующий качестве В редуцирующего скорость вращения вала электродвигателя планетарный циклоидный редуктор с цевочным зацеплением (рис.1.), находит все большее применение в качестве источника движения в технологическом оборудовании в самых различных промышленности: отраслях горнодобывающей, пищевой, перерабатывающей, машиностроении. Обусловлено это рядом преимуществ подобного рода приводов по сравнению с традиционными, построенными на базе эвольвентной зубчатой передачи:

- возможностью реализации широкого диапазона передаточных отношений. Оно определяется числом зубьев сателлита и варьируется в пределах от 6:1 до 101:1 в одной ступени. Более высокие передаточные отношения достигаются в многоступенчатых редукторах;
- многопарностью зацепления. Реальное число зубьев сателлита, передающих действие нагрузки крутящего момента, достигает 65 % от их общего количества. Отсюда вытекает большая нагрузочная способность и возможность выдерживать большие пиковые перегрузки:
- компактностью. Циклоидные цевочные редукторы обладают непревзойденными массогабаритными характеристиками при высоком коэффициенте полезного действия. Отсутствие трения скольжения в зацеплении позволяет приблизить КПД редуктора к 95% в каждой ступени.

Привод состоит из следующих основных узлов: электродвигателя 7; входного вала 6, на который посредством шпоночного соединения посажен эксцентрик 5; сателлитов 4 с боковыми отверстиями; обоймы 3 с цевочным колесом, образованным рядом равномерно расположенных окружности цевок, вращающихся вокруг неподвижных осей: выходного вала 1 с пальцами механизма параллельных кривошипов 2. В конструкции используется схема с двумя планетарными рядами. Диаметральное смещение рядов способствует равномерному распределению передаваемой нагрузки между элементами зацепления, снижению динамической нагруженности передачи.

Изменение частоты вращения выходного звена происходит следующим образом: по мере того как эксцентрик 5, являющийся водилом планетарной передачи, вращается по часовой стрелке, сателлиты 4 обкатываются по цевочному колесу обоймы 3, при этом за каждый оборот входного вала 6 сателлит 4 повернется в противоположном направлении на один зуб. Боковые отверстия сателлитов находятся в зацеплении с пальцами 2 механизма параллельных кривошипов, что обеспечивает передачу крутящего момента и изменение скорости вращения выходного вала 1. В механизме параллельных кривошипов и цевочном зацеплении реализуется многопарный контакт и фрикционное качение,

что гарантирует постоянство при передаче крутящего момента.

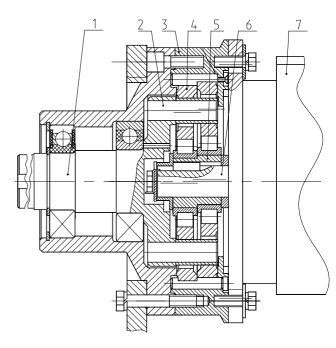


Рис.1. Электромеханический привод на основе трохоидной передачи.

Оригинальной деталью привода является сателлит, наружный профиль которого очерчивается укороченной эпициклоидой и описывается уравнениями:

$$X = R\cos\alpha + e\cos(z+1)\alpha - r\cos(\gamma+\alpha)$$

$$Y = R\sin\alpha + e\sin(z+1)\alpha - r\sin(\gamma\sin\alpha)\alpha$$

$$\gamma = arctg \frac{-r\sin(\gamma\sin\alpha)\alpha}{\cos z\alpha + R/\alpha(z+1)}$$
 угол

передачи;

R—радиус цевочного колеса;

е—эксцентриситет передачи;

z-число зубьев сателлита;

т-коэффициент укорочения;

α-- свободный параметр.

Разработка методов формообразования рабочего профиля сателлита трохоидной передачи является важной частью исследований надежности и оптимизации конструкции циклоидных приводов, проводимых в институте на протяжении полутора десятков лет. Имеющийся у нас опыт разработки и изготовления планетарно-цевочных механизмов

показал, что обработку рабочих поверхностей сателлита в условиях мелкосерийного производства целесообразно производить на специализированном оборудовании с числовым программным управлением методом копирования. Наряду с этим, при увеличении серийности производства представляется целесообразным производить формирование наружного контура сателлита методом обката.

2. Approximation of working profile of cycloid planetary pinion / Аппроксимация профиля зуба сателлита.

Высокие эксплуатационные характеристики электромеханического привода на основе трохоидной передачи могут быть обеспечены только при тщательном изготовлении рабочей поверхности сателлита, очерчиваемого укороченной эпициклоидой. Точность и качество его изготовления в значительной мере влияет на многопарность зацепления, а следовательно на нагруженность долговечность элементов передачи. В случае идеально точной геометрии зацепления все цевки беззазорной трохоидной передачи (ТП) имеют контакт с зубьями сателлита [1]. Практически же, вследствие неизбежных погрешностей элементов ТП, число цевок, передающих крутящий момент, оказывается меньше теоретически возможного. Кроме того, контактные напряжения в таком зацеплении, изготовленном даже с высокой степенью точности, распределяются крайне неравномерно. Это объясняется тем, что вследствие изменения значения приведенной контактной жесткости вдоль линии зацепления, максимальная нагрузка возникает на участках линии зацепления, где контактирующие поверхности имеют минимальный или близкий к нему приведенный радиус кривизны [2]. Для выравнивания контактных напряжений, обеспечения необходимых для сборки зазоров, компенсации погрешностей, возникающих при изготовлении и для обеспечения хороших условий смазки, целесообразна корректировка исходного профиля зуба, очерченного эквидистантой трохоиды, на переменную по его контуру величину. Использование для формообразования профиля технологического оборудования с числовым программным управлением позволяет в условиях часто меняющейся номенклатуры деталей мелкосерийного производства осуществлять быструю переналадку станка на обработку наружного контура сателлита с иным уравнением профиля. Кроме того, открываются широкие возможности для осуществления коррекции исходного контура сателлита различными способами: построением эквидистанты, перемещением, поворотом профиля на заданный угол или их комбинацией. Ввиду того, что рабочие органы станка способны отрабатывать два вида интерполяции, линейную и круговую, существует необходимость разработки методов аппроксимации трохоидного профиля сателлита прямыми линиями и дугами окружности, наиболее совпадающими с теоретическим профилем сателлита [3]. С этой целью необходимо оптимизировать аппроксимирующую функцию F(x) с помощью интерполирования математической

$$F = \sum_{i=1}^{n} \left[f(x_i) - \widetilde{f}(x_i) \right]^2 = \sum_{i=1}^{n} \left[\Delta S_i \right]$$

Целевая функция ΔS_i представляет собой расстояние от кривой, измеренное в направлении, перпендикулярном к заменяющей линии. Уравнение прямой (рис.2) имеет вид

$$x + By + C = 0$$
,

где B и C - параметры оптимизации.

Тогда
$$\Delta S_i^2 = \frac{(x_i + By_i + C)^2}{(1 + B^2)}$$

$$F(B,C) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(x_i + By_i + C)^2}{(1 + B^2)} \right] (1)$$

Здесь x_i и y_i - координаты рассматриваемой текущей точки исходной трохоиды, описывающей теоретический профиль сателлита.

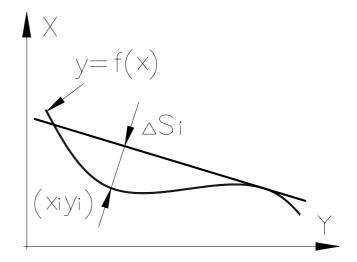


Рис.2. Построение целевой функции при аппроксимации участков трохоиды отрезками прямой.

Для поиска оптимального решения использован метод сопряженных градиентов. С целью получения минимальных значений функций F находятся соответствующие величины B и C. Направление вектора максимального градиента определяется с помощью частных производных. При этом использовано предположение, что сумма квадратов ошибок для некоторых граничных точек стремится K минимуму и находится в пределах допуска на изготовление:

$$\Delta S_{i} = \frac{(x_{i} + By_{i} + C)}{\sqrt{(1+B^{2})}}$$
 (2)

При условии $\partial F/\partial B=0$ и $\partial F/\partial C=0$ после упорядочения, формулы для нахождения В и С имеют вид:

$$C = a_1 + a_2 B$$

$$b_1 B^3 + b_2 B^2 + b_3 B + b_4 = 0$$
(4)

гле

$$a_1 = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i$$
; $a_2 = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} y_i$;

$$b_{1} = \sum_{i=1}^{n} (a_{2}y_{i}); b_{2} = -\sum_{i=1}^{n} (x_{i}y_{i} + a_{1}y_{i} + 2a_{2}x_{i});$$

$$b_{3} = \sum_{i=1}^{n} (y_{i}^{2} + x_{i}^{2} - 2a_{1}x_{i} + a_{2}y_{i});$$

$$b_{4} = \sum_{i=1}^{n} (x_{i}y_{i} + a_{1}y_{i})$$

По формулам (3) и (4) можно найти величины B_k и C_k при k=1,2,3...n 1,2,3...n и по уравнению (1) вычислить целевую функцию F.

При замене отрезков теоретического профиля дугами окружности (рис.3) необходимо определить радиус Ro и

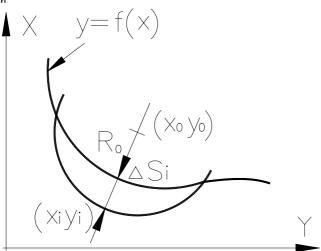


Рис.3. Построение целевой функции при аппроксимации участков трохоиды дугами окружности.

координаты центра $(x_0$, $y_0)$. В этом случае целевая функция примет вид:

$$\Delta S_{i} = \sqrt{(x_{i} - x_{0}')^{2} + (y_{i} - y_{0}')^{2}} - R_{o}; \quad (5)$$

$$F(x_{0}, y_{0}, R_{0}) = \sum_{i=1}^{n} \sqrt{(x_{i} - x_{0})^{2} + (y_{i} - y_{0})^{2}} - R_{o}$$

Метод решения (5) аналогичен (2).

Методика аппроксимации контура сателлита отрезками прямой и дугами окружности позволяет аппроксимировать трохоидный профиль сателлита в непосредственной связи с допусками на изготовление, а также получать необходимую информацию для реализации методов оптимального формообразования трохоидных поверхностей на оборудовании с программным управлением

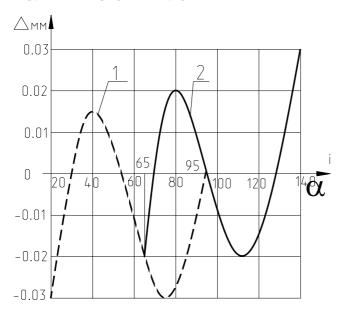


Рис.4. Зависимость погрешности аппроксимации Δ от угла развертки \mathcal{C}_i рабочего участка профиля зуба сателлита при замене участков трохоиды: 1- дугами окружности; 2-отрезками прямой.

Результаты расчетов по данной методике показали, что для аппроксимации профиля сателлита можно использовать ломаные в виде отрезков прямой или дуг окружности, а также комбинированный профиль, представляющий их совокупность. В качестве примера на рис.4. приведены результаты замены теоретического профиля сателлита трохоидной передачи комбинированным со следующими параметрами:

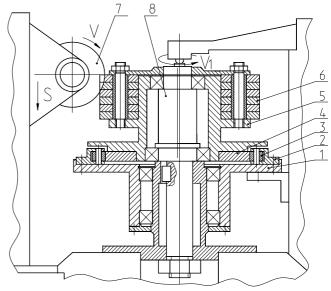
число зубьев сателлита — 25; число цевок солнечного колеса — 26; радиус цевки — 9,5; радиус сателлита — 143; эксцентриситет — 4.

В интервале α_i = 20В...95В использована дуга окружности, а в интервале α_i = 65В...140В - прямая линия. Отметим, что в диапазоне α_i = 65В...90В может быть использована как прямая, так и дуга окружности. Величина отклонения от теоретического профиля в 0,01...0,03 мм, образующаяся при замене дугой окружности или прямой, не превышает допуска на изготовление.

Проведенные исследования в этой области показали, что при замене теоретического профиля дугами окружности или прямыми угол давления в зацеплении уменьшается более чем на 2°, что способствует увеличению прочности зуьев и улучшению эксплуатационных характеристик редуктора.

3. Attachment for cutting cycloidal profile gears / Приспособление для нарезания циклоидного профиля зуба.

С увеличением серийности производства и изготовлении больших партий сателлитов становятся оправданными временные и материальные затраты на проектирование, изготовление и эксплуатацию специальной оснастки, позволяющей осуществлять нарезание эпициклоидного контура зуба. Предлагаемое приспособление (рис.5) предназначено для установки на зубофрезерный или на зубошлифовальный станки и пригодно как для предварительного профилирования, так и окончательного формирования рабочего контура сателлита трохоидной передачи.



Данное устройство содержит механизм формообразования профиля сателлита, в котором на подшипниках установлен неподвижный корпус 1, жестко связанный с контрподдержкой станка с помощью кронштейна [4]. В корпусе 1 закреплено сменное эталонное цевочное колесо 2 с равномерно расположенными по окружности цевками 3, находящимися в зацеплении со сменным эталонным сателлитом 4, жестко связанным со столом 5. На столе установлены заготовки сателлитов 6, фиксируемые с помощью втулок со шпильками и крышки с гайками. Заготовки 6 совершают сложное плоско-параллельное движение относительно режущего инструмента 7 от сменного эксцентрикового вала 8, один из концов которого закреплен с помощью гайки и шпонки в шпинделе, второй—поджимается кронштейном контрподдержки станка.

Нарезание трохоидного профиля зуба режущим инструментом осуществляется за счет следующих движений: главного, движения формообразования и подач.

Главное движение V определяется скоростью вращения режущего инструмента.

Движение формообразования V_1 представляет собой непрерывное вращение заготовок и режущего инструмента, обеспечиваемое кинематикой станка и кинематикой механизма формообразования профиля приспособления.

Движение подачи S осуществляется режущим инструментом вдоль оси нарезаемых заготовок.

Приспособление работает следующим образом:

От стола зубофрезерного или зубошлифовального станка непрерывное вращение передается шпинделю и закрепленному в нем эксцентриковому валу 8, далее через подшипники движение получает сателлит 4, закрепленный на столе 5, на котором установлены нарезаемые колеса 6. Сателлит 4 со столом 5 и заготовками 6 совершает сложное плоскопараллельное движение относительно закрепленного в неподвижном корпусе 1 цевочного колеса 2 с равномерно расположенными по окружности цевками 3, и режущего инструмента 7, установленного симметрично оси цевочного колеса 2, подача S которого (исчисляемая в миллиметрах на один оборот заготовки) и будет производить резание.

Приспособление пригодно для обработки типоразмеров зубчатых колес с внешним венцом и произвольным числом зубьев. Его настройка на новый размер колес осуществляется за счет установки сменных эксцентрикового вала 8 с нужным эксцентриситетом e и установки цевочного колеса 2 и сателлита 4, число цевок z_4 и число зубьев z_2 которых соответствует параметрам трохоидной передачи, для которой нарезаются сателлиты.

Использование в качестве механизма формообразования профиля эталонной трохоидной передачи значительно упрощает конструкцию приспособления и позволяет повысить точность обработки профиля зуба сателлита на за счет следующего:

- реализации многопарности в цевочном зацеплении (отклонения эталонного профиля от теоретического усредняются);
- уменьшения количества кинематических цепей и значительного повышения за счет этого многопарности зацепления и жесткости привода движения формообразования;
- -- простоты конструкции и характера движения режущего инструмента, что позволяет использовать системы контроля его размеров механизмы компенсации износа.

4. Conclusion / Заключение.

Показано, что при рациональной аппроксимации трохоидного профиля зуба сателлита отрезками прямой и дугами окружности, реализуемой на станках с программным управлением, может быть достигнуто уменьшение угла передачи. Обоснована целесообразность использования комбинированной аппроксимирующей ломаной, состоящей из дуг окружностей и отрезков прямой. Предложено приспособление для формообразования циклоидного профиля сателлита трохоидной передачи методом обката.

5. Literature / Литература:

- 1. Сигов И.В. Исследование планетарно-цевочного редуктора. Передачи в машиностроении. М.Машгиз. 1951.
- 2. Шевцов Е.Н., Сергеев С.Т. Проектирование внутреннего цевочного зацепления с учетом технологии его изготовления. Детали машин. Киев.- 1985.
- 3. Берестнев О.В., Янкевич Н.Г. Исследование цевочного зацепления трохоидной передачи. Свердловск.-1989.
 - 4. Патент №1833584, Янкевич Н.Г., Рудновский М.В.