DOI: 10.17117/na.2015.01.161

Поступило в редакцию: 28.01.2015

<http://ucom.ru/doc/na.2015.01.161.pdf>**Цуканов О.Н.****Прогрессивные зубчатые передачи на базе конических колес, методы профилирования зубьев и синтеза зацеплений****Tsukanov O.N.****Progressive gears on the base of the conical wheels, methods for the profiling of teeth and synthesis of gearings**

Представлены разработки прогрессивных зубчатых передач на скрещивающихся, пересекающихся и параллельных осях, образуемых из эвольвентных и неэвольвентных конических колес. Описаны методы профилирования зубьев и новая методология синтеза зацеплений в обобщающих параметрах

Ключевые слова: зубчатые передачи, конические колеса, профилирование, синтез

Presents the development of progressive gears on skew, intersecting and parallel axes formed of involute and uninvolute conical wheels. Described methods for the profiling of teeth and the new methodology of synthesis of gearings in generalizing parameters

Key words: gears, conical wheels, profiling, synthesis

Цуканов Олег Николаевич*Доктор технических наук, профессор**Южно-Уральский государственный университет**Челябинская область, г. Златоуст, ул. Тургенева, 16***Tsukanov Oleg Nikolaevich***Doctor of Technical Sciences, Professor**South-Ural state university**Chelyabinsk region, Zlatoust, Turgenyeva st., 16*

Одной из актуальных фундаментальных проблем механики машин является проблема создания высокоресурсных и высокоточных механизмов для различных, в том числе экстремальных, условий работы в широком диапазоне нагрузок и скоростей.

Основой многих механизмов, как известно, являются зубчатые передачи. От точности и плавности их работы в значительной степени зависит точность и плавность движений рабочих органов различных машин и роботов, точность и плавность поворота выходных валов электромеханических приводов различного назначения. Работа автора, в частности, связана с разработкой прогрессивных зубчатых передач для поворота антенн, сканирующих устройств, солнечных батарей и других объектов на Земле и в космосе.

Широкие возможности для решения указанной проблемы открывает использование зубчатых передач, образуемых на базе конических (по форме заготовок) колес с эвольвентным и неэвольвентным профилем зубьев, формируемым инструментом реечного и дискового типа. Сравнительно простая и высокопроизводительная технология формообразования зубьев червячной фре-

зой и червячным шлифовальным кругом, относящихся к инструментам реечного типа, обеспечивает высокую точность профиля. В качестве инструмента дискового типа для формообразования внутренних зубьев используется долбяк.

В различных комбинациях конических зубчатых колес, в том числе с эвольвентными цилиндрическими зубчатыми колесами, можно реализовывать разнообразные схемы зубчатых механизмов, легко устраняя люфты выходных валов и компенсируя смещение пятна контакта зубьев при сборке и в процессе эксплуатации (по мере износа рабочих поверхностей зубьев) за счет соответствующего смещения конического колеса [1].

Установлено, что в зубчатых передачах на скрещающихся осях с эвольвентными коническими колесами, формируемыми инструментом реечного типа, контакт зубьев в общем случае точечный, а для получения линейного контакта необходимо соблюдать определенное условие, связывающее угол зацепления с углами конусности колес и наклона зубьев. В эвольвентных передачах на пересекающихся осях возможен только точечный контакт зубьев. В частном случае, когда одно из конических колес вырождается в цилиндрическое колесо, получаем эвольвентную цилиндро-коническую передачу.

Установлено, что в неэвольвентных цилиндро-конических зубчатых передачах на скрещающихся и на пересекающихся осях, образуемых на базе эвольвентного цилиндрического исходного звена, можно получить любой характер контакта от линейного до ярко выраженного точечного за счет определенного выбора числа зубьев колес. Неэвольвентным огибающим звеном в таких передачах является коническое зубчатое колесо.

Одним из основных преимуществ цилиндро-конических передач является возможность получения таких компоновочных схем механизмов, которые не могут быть осуществлены с помощью традиционных цилиндрических и конических передач. Например, цилиндро-коническую передачу на скрещающихся осях можно осуществить при сколь угодно малом межосевом расстоянии, что невозможно при использовании винтовой передачи, а цилиндро-коническую передачу на пересекающихся осях – при малых межосевых углах, что невозможно при использовании обычной конической передачи из-за отсутствия оборудования для изготовления колес с малым углом конусности [1].

Наиболее компактными передачами являются передачи внутреннего зацепления, в которых исходным звеном является эвольвентное цилиндрическое колесо с внутренними зубьями, а огибающим звеном – неэвольвентное коническое колесо с внешними зубьями. Высокая многопарность зацеплений делает такие передачи конкурентоспособными по нагрузочным и массогабаритным характеристикам с волновыми зубчатыми передачами.

Вопросы образования приближенного внутреннего зацепления цилиндро-конических передач и профилирования зубьев неэвольвентных конических колес инструментом реечного типа рассмотрены в работах [2–4]. Использование таких передач позволило создать электромеханический привод для механизмов углового поворота объектов космической техники (антенн, сканирующих устройств, солнечных батарей и др.) [5].

Передачи, составленные из эвольвентных конических колес на параллельных осях, также могут быть успешно использованы в качестве люфтовывбирающих передач [6]. Для этого колеса нужно устанавливать конусами навстречу друг другу. Люфт в зацеплении будет устраняться автоматически под действием пружины. При определенном выборе углов наклона зубьев колес такая люфтовывбирающая передача легко может быть превращена в механизм свободного хода. Зубчатые передачи, образуемые из эвольвентных и неэвольвентных конических колес, направленных конусами навстречу друг другу, легко встраиваются в механизмы без изменения их конструкции. Кроме того, применение для изготовления конических зубчатых колес того же оборудования, что и для изготовления эвольвентных цилиндрических зубчатых колес, позволяет достичь высокой точности передач и способствует их быстрому внедрению в производство. Результаты экспериментальных исследований одного из вариантов такой передачи показали повышение плавности работы и снижение нагруженности зубьев на 10-15 % по сравнению с передачами, образованными из эвольвентных цилиндрических колес. Исследованная передача была использована вместо цилиндрической передачи в последней ступени редуктора привода системы управления солнечными батареями на предприятии Российского ракетно-космического центра (г. Самара).

Кроме того, автором статьи предлагается расширить спектр прогрессивных зубчатых передач за счет использования в качестве исходного звена эвольвентного конического колеса с внутренними зубьями. Такие колеса могут быть нарезаны на зубодолбежных станках с ЧПУ или сделаны на 3D-принтере.

К сожалению, несмотря на бурное развитие технологий изготовления зубчатых колес, при проектировании зубчатых передач до сих пор превалирует традиционный метод синтеза зацеплений при заданных параметрах исходного производящего контура, т. е. по схеме: от технологии изготовления – к качественным показателям зацепления и геометрическим параметрам передачи. Этот метод не позволяет определить предельную область существования зацепления для заданной схемы передачи, а, следовательно, исследовать все его геометро-кинематические возможности. Часто удовлетворить заданные требования к передачам с использованием этого метода оказывается просто невозможным из-за ограничений по заострению и подрезанию зубьев неэвольвентных конических колес. Особенно остро эта проблема стоит при жестких требованиях к габаритным размерам механизма.

Теория проектирования эвольвентных цилиндро-конических зубчатых передач внешнего зацепления традиционным методом изложена в работе [1].

В монографии [7] автора статьи изложена теория синтеза зацеплений неэвольвентных цилиндро-конических передач, в так называемых, обобщающих параметрах, позволяющая полностью раскрыть их геометро-кинематических возможности. По этому методу сначала определяется предельная по заострению и интерференции зубцов (зубьев без переходных кривых) неэвольвентного конического колеса область существования зацепления в обобщающих координатах: текущий угол зацепления – текущий угол профиля зубцов исходно-

го звена. Затем внутри этой области находится локальная область существования зацепления, соответствующая наиболее благоприятному комплексу геометро-кинематических показателей контакта зубьев (коэффициента перекрытия, приведенного радиуса кривизны контактирующих поверхностей, формы, размеров и положения площадки контакта, скорости и коэффициентов скольжения).

Параметры производящих контуров формообразующего инструмента определяются как функции параметров зацепления. Иными словами, проектирование выполняется по схеме: от качественных показателей зацепления и геометрических параметров передачи – к технологии изготовления.

В результате обобщения результатов теоретических исследований автором статьи установлено следующее:

1) предельная область существования зацепления в системе обобщающих координат определяется совокупностью значений независимых параметров схемы передачи (межосевого угла, углов начальных конусов колес, радиуса начальной окружности и угла наклона зуба на начальной поверхности исходного звена), числом зубьев исходного звена и их относительной толщиной на окружности вершин;

2) предельная область существования зацепления ограничивается кривой возможной интерференции зубцов у основания и кривыми их заострения, которые являются геометрическим местом множества граничных точек локальных кривых заострения, соответствующих множеству возможных значений угла профиля на окружности вершин зубцов исходного звена;

3) локальная область существования зацепления ограничивается отрезком прямой, соответствующей прямолинейной форме образующей поверхности вершин зубцов исходного звена, отрезками прямых, соответствующих значениям углов зацепления в его крайних торцовых сечениях и кривой линией, соответствующей форме поверхности вершин зубцов огибающего звена.

Для полного раскрытия геометро-кинематических возможностей зубчатых зацеплений, в которых эвольвентный профиль зубьев формируется посредством производящей рейки, а неэвольвентный профиль зубьев – посредством производящего колеса, автором статьи разработан метод компьютерного управления комплексом геометро-кинематических показателей контакта зубьев на стадии синтеза в обобщенной области существования путем изменения обобщающих координат крайних точек локальной области существования.

В связи с повышением уровня технологий формообразования зубчатых колес настало время расширить понятие исходного звена.

Под исходным звеном предлагается понимать зубчатое колесо, получаемое в процессе формообразования зубьев производящей рейкой с заданным, в общем случае криволинейным, профилем зубцов в торцовом сечении, причем траектория перемещения рейки выбирается в зависимости от вида передачи, формы поверхности вершин зубьев и параметров их контакта.

В частном случае, если производящая рейка имеет прямолинейный торцовый профиль зубцов и перемещается по прямолинейной траектории, то получаем эвольвентный торцовый профиль зубцов воспроизводимого колеса –

исходного звена. При этом его поверхность вершин может быть либо цилиндрической, либо конической. Во втором случае получаем эвольвентное коническое исходное звено.

В общем случае кинематического огибания воспроизводится зубчатое колесо с переменным коэффициентом смещения вдоль его оси. Задача заключается в обоснованном определении вида функции изменения коэффициента смещения в зависимости от аппликаты торцового сечения исходного звена с целью получения наиболее благоприятного комплекса геометро-кинематических показателей контакта зубьев для каждой схемы зубчатой передачи. При синтезе зацепления в обобщающих координатах сначала нужно установить влияние на эти показатели вида функций граничных линий и обобщающих координат одной из крайних точек поверхности зацепления, определяющей его локальную область существования в предельной области.

Неэвольвентный профиль зубца исходного звена теоретически может быть образован перекатыванием по некоторой (основной) окружности отрезка некоторой кривой линии, в частности, дуги окружности, ветви параболы, гиперболы и др., а практически методом обкатки заготовки производящей рейкой с соответствующим профилем зубцов. Перекатываемая кривая может состоять и из нескольких участков различной формы, а в самом общем случае может быть задана набором точек с определенным шагом дискретности. Соответствующий профиль зубцов практически может быть реализован на станках с числовым программным управлением.

При заданных значениях независимых параметров схемы зубчатой передачи геометрия пространственного зацепления в общем случае полностью определяется значениями следующих обобщающих координат:

- торцового угла зацепления, определяющего угловое положение нормали и касательной к торцовому профилю зубца в неподвижной системе координат;
- двух профильных углов, определяющих расстояния от оси исходного звена до нормали и касательной к торцовому профилю соответственно;
- относительной толщины зубца на окружности вершин в долях диаметра наибольшей основной окружности – масштабного фактора передачи.

Функцию образующей поверхности вершин зубцов исходного звена и связанную с ней функцию изменения коэффициента смещения в зависимости от аппликаты торцового сечения предлагается выбирать в результате анализа инерционных зон касания производящей и воспроизводимой поверхностей на стадии компьютерного проектирования различных видов зубчатых передач. Основным критерий – качество локализованного контакта зубьев, при котором исключается их кромочное касание вследствие погрешностей изготовления и монтажа зубчатых колес, снижается вероятность интерференции вследствие деформаций элементов механизма.

Использование конического (по форме заготовки) исходного звена с эвольвентным и неэвольвентным торцовым профилем зубцов и метода синтеза зацеплений в обобщающих параметрах расширяет границы улучшения их геометро-кинематических показателей и тем самым открывает новые воз-

возможности для создания высокоресурсных и высокоточных зубчатых механизмов в широком диапазоне нагрузок и скоростей.

Список литературы:

1. Лопатин Б.А., Цуканов О.Н. Цилиндро-конические зубчатые передачи: Монография. Челябинск: ЮУрГУ, 2005. 200 с.
2. Лопатин Б.А., Полуэктов Е.А., Хаустов С.А. Формирование внутреннего приближенного зацепления цилиндро-конических передач // Вестник ЮУрГУ. 2011. № 11. С. 62–69.
3. Полуэктов Е.А., Лопатин С.Д. Модификация профилей зубьев в цилиндро-конической передаче внутреннего зацепления // Наука ЮУрГУ. Челябинск: центр ЮУрГУ, 2011. С. 160–164.
4. Плотникова С.В., Полуэктов Е.А. Способ профилирования зубьев конической шестерни цилиндро-конических передач внутреннего зацепления // Наука ЮУрГУ. Челябинск: ЮУрГУ, 2013. С. 329–332.
5. Цуканов О.Н., Лопатин Д.Б., Полуэктов Е.А. Электромеханический привод для механизмов углового поворота объектов космической техники // Вестник машиностроения. 2009. № 2. С. 14–16.
6. Лопатин Б.А. Перспективы применения в машиностроении зубчатых передач из эвольвентно-конических колес // Актуальные вопросы в научной работе и образовательной деятельности. Ч. 4. Тамбов. 2014. С. 108–109.
7. Цуканов О.Н. Основы синтеза незвольвентных зубчатых зацеплений в обобщающих параметрах: монография. Челябинск: УрГУ, 2011. 140 с.

References:

1. Lopatin B.A., Tsukanov O.N. Cylinder-conical gears: monograph. Chelyabinsk: SUSU, 2005. 200 p.
2. Lopatin B.A., Poluektov E.A., Khaustov S.A. Formation of the approximate internal gearing of cylinder-conical gears. // Journal of the SUSU. 2011. № 11. С. 62–69.
3. Poluektov E.A., Lopatin S.D. Modification of the profiles teeth in the cylinder-conical gear internal gearing // Science of the SUSU. Chelyabinsk: SUSU, 2011. Pp. 160–164.
4. Plotnikova S.V., Poluektov E.A. Method of profiling the conical gear teeth of cylinder-conical gears internal gearing. Chelyabinsk: SUSU, 2013. Pp. 329–332.
5. Tsukanov O.N., Lopatin D.B., Poluektov E.A. Electromechanical drive for mechanisms angular rotation of objects of space technology // Journal of the mechanical engineering. 2009. № 2. Pp. 14–16.
6. Lopatin B.A. Prospects of application in mechanical engineering gears from involute-conical wheels // Current issues in scientific work and educational activity. P. 4. Tambov. 2014. Pp. 108–109.
7. Tsukanov O.N. Bases of synthesis of uninvolute gearings in generalizing parameters: monograph. Chelyabinsk: SUSU, 2011. 140 p.

© 2015, Цуканов О.Н.

Прогрессивные зубчатые передачи на базе конических колес, методы профилирования зубьев и синтеза зацеплений

© 2015, Tsukanov O.N.

Progressive gears on the base of the conical wheels, methods for the profiling of teeth and synthesis of gearings