

Заключение

В планетарной плавнорегулируемой передаче с беззазорным зацеплением, реализуемым в результате силового замыкания сателлита и секторов центрального зубчатого колеса, механизм регулирования передаточного отношения может быть значительно упрощен за счет ликвидации кинематической цепи радиального перемещения сателлита, включающей управляющую и замыкающую вспомогательные планетарные передачи. Следовательно, беззазорное зацепление сателлита и центрального зубчатого колеса в плавнорегулируемой передаче является ее достоинством.

Но при этом узел сателлита должен быть оснащен замыкающим упругим элементом и стопором (предположительно, гидроцилиндром с магнитоологической жидкостью), исключая нежелательное с точки зрения качества функционирования передачи увеличение радиуса водила. Наличие стопора требует наличия электронной системы управления, что можно отнести к недостаткам беззазорной плавнорегулируемой передачи.

При этом в плавнорегулируемой передаче желательно использовать зацепления с осевым перекрытием зубьев и боковым зазором, такие как эллиптическое (зацепление Гребенюка) и косозубое циклоидально-цевочное вместо эвольвентного.

Во всех случаях использования в графических моделях беззазорной плавнорегулируемой передачи эвольвентного, эллиптического и циклоидально-цевочного зацеплений получены удовлетворительные значения углов регулирования, позволяющие обеспечить эффективное функционирование магнитоологического стопора. Наиболее приемлемые значения угла регулирования достигаются в передаче с циклоидально-цевочным зацеплением.

Получено 28.01.2017

Библиографические ссылки

1. Элементы привода приборов: расчет, конструирование, технологии / под ред. Ю. М. Плескачевского. – Минск : Беларус. навука. – 2012. – 769 с.
2. Даньков А. М. Сборка и регулировка основных модификаций плавнорегулируемой зубчатой передачи // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2005. – № 10. – С. 38–43.
3. Даньков А. М. Как управлять передаточным отношением зубчатой планетарной плавнорегулируемой передачи // Наука и техника. – 2016. – № 3. – С. 200–208.
4. Иоффе А. З., Даньков А. М. Конструктивные и кинематические особенности плавнорегулируемых зубчатых передач // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2011. – № 1. – С. 27–38.
5. Колмаков С. В. Силовой анализ безводильных планетарных передач с однозвенными и двухзвенными сателлитами // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2013. – № 3. – С. 337–346.
6. Лаутин Ф. Ю. К вопросу применения зацепления Новикова в планетарной передаче типа $K-H-V$ // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 2. – Курск. – 2011. – С. 110–115.
7. Прикладная механика : учеб. пособие для вузов / под ред. В. М. Осецкого. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977.
8. Патент 2057267 РФ, МКИ F16H1/24. Зубчатая передача / Г. П. Гребенюк. – Заявл. 07. 04. 93 ; опубл. 27.03.96.
9. Математическое моделирование работы редуктора с циклоидально-эксцентриковым зацеплением / А. М. Бурбенчиков, Н. Р. Щербаков, В. В. Становской, С. М. Казакичюс, Т. А. Ремнева // Вычислительные технологии. – 2009. – Т. 14, № 2. – С. 51–57.
10. Там же.
11. Даньков А. М. К вопросу о выборе зацепления для плавнорегулируемой зубчатой передачи // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2016. – Т. 2, № 1. – С. 1–11.

УДК 621.833

В. Е. Антонюк, доктор технических наук, ГНУ «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», Минск

С. Н. Поддубко, кандидат технических наук, ГНУ «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», Минск

ОСОБЕННОСТИ НОРМИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ НОРМ КОНТАКТА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПЛАНЕТАРНЫХ ПЕРЕДАЧ

Введение

Планетарные передачи широко применяются в механических и гидромеханических передачах современных гусеничных и колесных машин. Однако использование ГОСТ 1643–81 «Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски» [1] применительно к планетарным передачам требует уточнения ряда положений. Приведенный ниже анализ

норм контакта касается наиболее часто применяемых в планетарных передачах гусеничных и колесных машин зубчатых колес с коэффициентом осевого перекрытия $\xi_B \leq 1,2$.

Показатели контакта зубьев в передаче имеют решающее значение для силовых передач, так как недостаточная величина контакта приводит к интенсивному износу и выходу из строя передачи.

По ГОСТ 1643–81 показателями, определяющими контакт зубьев, могут быть:

- для зубчатого колеса – погрешность направления зуба, характеризующая контакт по длине зуба, и погрешность профиля зуба, характеризующая контакт по высоте зуба;
- в паре – отклонения относительных размеров суммарной зоны касаний;
- в передаче – отклонения относительных размеров суммарного пятна контакта.

Рассмотрим более подробно особенности использования каждого из вышеприведенных вариантов назначения норм контакта применительно к особенностям конструкции планетарных передач.

При использовании в качестве показателей контакта погрешности направления и погрешности профиля в таблице параметров зубчатого колеса задается допуск на направление зуба F_β и допуск на


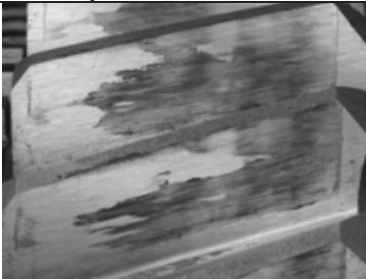

погрешность профиля зуба f_f . Однако использование этих параметров для нормирования контакта не гарантирует получение желаемого пятна контакта в паре или передаче.

В таблице приведены пятна контакта цилиндрической косозубой зубчатой пары модуля $m = 5$ с числами зубьев $z_1 = 35$ и $z_2 = 26$; зубчатые колеса были изготовлены с использованием зубошлифования и соответствовали по допускам на направление зуба и на погрешность профиля зуба степени точности 8-7-7 по ГОСТ 1643–81.

Как видно из таблицы, пятна контакта не соответствуют относительным размерам и имеют выход на кромку зуба, что не допускается по ГОСТ 1643–81.

Одной из причин такого несоответствия можно считать определение погрешности направления и погрешности профиля по ГОСТ 1643–81 как суммарных погрешностей от углов и формы.

Пятна контакта цилиндрической косозубой зубчатой пары модуля $m = 5$

Метод контроля пятна контакта	Зубчатое колесо $z_1 = 35$	Зубчатое колесо $z_2 = 26$
С измерительным колесом		
В паре на стенде под нагрузкой		

По стандарту DIN 3962 [2] общая погрешность профиля (F_f – Profil-Gesamtabweichung) складывается из погрешности угла профиля ($f_{H\alpha}$ – Profil-Winkelabweichung) и погрешности формы профиля (f_f – Profil-Formabweichung), что позволяет более целенаправленно задавать расположение пятна контакта по высоте зуба; общая погрешность контактной линии (F_β – Flankenlinien-Gesamtabweichung) складывается из погрешности угла контактной линии ($f_{H\beta}$ – Flankenlinien-Winkelabweichung) и погрешности формы контактной линии ($f_{\beta f}$ – Flankenlinien-Formabweichung), что позволяет более целенаправленно задавать расположение пятна контакта по длине зуба.

В результате можно сделать вывод, что использование для нормирования параметров контакта погрешности направления и погрешности профиля по ГОСТ 1643–81 не гарантирует достижения требуемо-

го пятна контакта даже для цилиндрических зубчатых передач с жестким положением осей, тем более для планетарных зубчатых передач с плавающим положением осей.

В качестве показателей контакта для зубчатой передачи по ГОСТ 1653–81 можно использовать:

f_{xr} – отклонение от параллельности проекций рабочих осей зубчатых колес на плоскость, в которой лежит одна из осей и точка второй оси в средней плоскости передачи, и f_{yr} – перекос осей, отклонение от параллельности проекции рабочих осей зубчатых колес в передаче на плоскость, параллельную одной из осей и перпендикулярную плоскости, на которой лежит эта ось;

– суммарное пятно контакта как часть активной боковой поверхности зуба зубчатого колеса, на которой располагаются следы прилегания зубьев парного

зубчатого колеса в собранной передаче после вращения под нагрузкой, устанавливаемой конструктором;

– мгновенное пятно контакта как часть активной боковой поверхности зуба колеса передачи, на которой располагаются следы его прилегания к зубьям шестерни, покрытой красителем, после поворота колеса собранной передачи на полный оборот при легком торможении, обеспечивающем непрерывное контактирование зубьев обоих зубчатых колес.

Возникает вопрос: как следует использовать требования по нормам контакта из ГОСТ 1653–81 для планетарных передач?

Показатели положения рабочих осей f_{xr} – отклонение от параллельности проекций рабочих осей – и f_{yr} – перекося осей для планетарных передач – практически не используются, так как в планетарных передачах один или два элемента имеют подвижность. Пункт 2.3.1 ГОСТ 1643–81 допускает не контролировать пятно контакта в зубчатой передаче, если точность зубчатых колес по нормам контакта и действительные значения f_{xr} и f_{yr} соответствуют требованиям ГОСТа. Но так как значения f_{xr} и f_{yr} для зубчатых колес планетарных передач не назначаются, то остается требование контроля пятна контакта в передаче.

Суммарное пятно контакта как часть активной боковой поверхности зуба зубчатого колеса, на которой располагаются следы прилегания зубьев парного зубчатого колеса в собранной передаче после вращения под нагрузкой, устанавливаемой конструктором, могло бы давать максимум информации о действительных пятнах контакта в собранной планетарной передаче. Для выполнения этого требования необходим силовой стенд для обкатки собранной передачи под нагрузкой. Однако в большинстве случаев в собранной планетарной передаче практически невозможно увидеть пятна касания зубчатых колес, так как зона обзора закрыта коронной шестерней. Для оценки суммарного пятна в собранной планетарной передаче после вращения под нагрузкой, как это требуется по ГОСТ 1643–81, необходимо произвести разборку передачи. Если при проведении исследований по оценке суммарного пятна контакта в собранной передаче это можно сделать, то для производственного контроля суммарного пятна контакта разборку проводить нецелесообразно, и в производственных условиях это практически невыполнимо. Поэтому можно сделать вывод о невозможности использования понятия суммарного пятна контакта в основной редакции ГОСТ 1643–81 для оценки норм контакта при производственном контроле без проведения специального оснащения.

Мгновенное пятно контакта как часть активной боковой поверхности зуба колеса передачи, на которой располагаются следы его прилегания к зубьям шестерни, покрытой красителем, после поворота колеса собранной передачи на полный оборот при легком торможении, обеспечивающем непрерывное контактирование зубьев обоих зубчатых колес, как

это определяется в основной редакции по ГОСТ 1643–81, отличается от суммарного пятна контакта только нагрузкой торможения; в результате также можно сделать вывод о невозможности использования понятия мгновенного пятна контакта в основной редакции ГОСТ 1643–81 для оценки норм контакта.

Однако для уточнения основной редакции понятий «суммарное пятно контакта» и «мгновенное пятно контакта» в ГОСТ 1643–81 имеется пункт 2.3.3 «Допускается оценивать точность зубчатого колеса по суммарному или мгновенному пятну контакта его зубьев с зубьями измерительного колеса», который применительно к особенностям планетарных передач полностью исключает смысл суммарного и мгновенного пятна контакта в основной редакции этих понятий.

В основной редакции этих понятий по ГОСТ 1643–81 смысл суммарного пятна контакта был в обеспечении правильного пятна контакта в собранной передаче с обкаткой под нагрузкой; в этом случае гарантировалось правильное положение пятна контакта без выхода на кромку в пределах заданных относительных размеров при всех возможных вариантах изменения положения осей плавающих звеньев планетарной передачи и с изменением положения осей зубчатых колес от деформаций всех элементов планетарной передачи под нагрузкой.

Пункт 2.3.3 применительно к планетарным передачам исключает контроль пятна контакта при изменении положения осей, которые являются конструктивной особенностью планетарных передач, и исключает учет деформаций элементов планетарной передачи, которые практически всегда имеются в конструкциях планетарных передач. Однако именно эта трактовка пятна контакта по пункту 2.3.3 получила применение в конструкторской документации зубчатых колес планетарных передач с такими формулировками, как, например:

- *пятно контакта с зубьями измерительного колеса;*
- *суммарное пятно контакта с измерительным колесом;*
- *мгновенное измерительное пятно контакта.*

Помимо того что вышеприведенные формулировки полностью исключают основной смысл контроля норм контакта, но даже в них не соблюдаются требования ГОСТ 1643–81, в котором нет таких параметров, как «*пятно контакта с зубьями измерительного колеса*» и «*мгновенное измерительное пятно контакта*». При использовании параметра «суммарное пятно контакта с измерительным колесом» по ГОСТ 1643–81 (табл. 12, пункт примечания 3) при контроле с измерительным колесом относительные размеры суммарного пятна должны быть увеличены по сравнению с базовыми размерами суммарного пятна контакта.

Еще более интересным становится трактовка в пункте 2.3.3 понятия «*измерительное колесо*». В приложении 1 ГОСТ 1643–81 в п. 2 дано определение: «*Под измерительным зубчатым колесом понимается зубчатое колесо повышенной точности,*

применяемое в качестве измерительного элемента для однопрофильного и двухпрофильного методов контроля зубчатых колес».

Возникает вопрос, о каком «измерительном колесе» в пункте 2.3.3. идет речь – для однопрофильного или двухпрофильного контроля?

Если руководствоваться основными формулировками понятий «*суммарное пятно контакта*» и «*мгновенное пятно контакта*» как части активной боковой поверхности зуба зубчатого колеса, на которой располагаются следы прилегания зубьев парного зубчатого колеса в собранной передаче после вращения при торможении, обеспечивающем непрерывное контактирование зубьев, то речь идет об однопрофильном контроле. Однако для контроля пятна контакта при однопрофильном контроле обычно используется контрольно-обкатной станок, обеспечивающий торможение и прилегание зубьев парного зубчатого колеса. Специальные «*измерительные колеса*» для подбора пар по пятну контакта не применяются. Использование контрольно-обкатных станков с неподвижными осями не позволяет создавать изменения положения осей зубчатых колес в планетарной передаче и не может обеспечить контроль суммарного пятна контакта в основной редакции по ГОСТ 1643–81.

В большинстве случаев при использовании пункта 2.3.3 под «*измерительным колесом*» понимается измерительное колесо, используемое при двухпрофильном контроле на приборах (межцентромерах) двухпрофильного контроля. Если при использовании контрольно-обкатного станка и парного зубчатого колеса имеется хоть близкая имитация зацепления в передаче, то контроль пятна контакта в зацеплении с измерительным колесом может давать совершенно противоположную оценку пятна контакта по сравнению с тем, что нужно для обеспечения правильной работы планетарной передач.

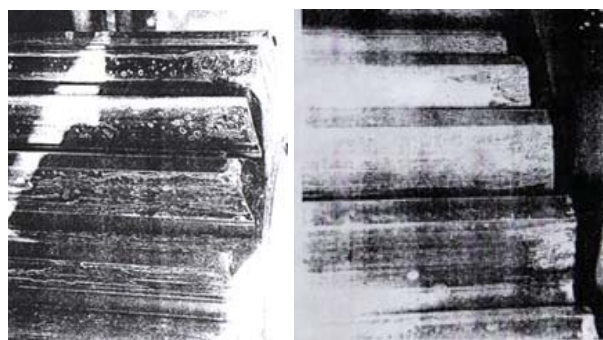
Во-первых, при использовании измерительного колеса для оценки суммарного пятна контакта имеется требование по ГОСТ 1643–81 (табл. 12, примечание 3): «*При контроле с измерительным колесом относительные размеры суммарного пятна должны быть увеличены по сравнению с указанными в таблице 12*». Хотя этим пунктом практически никто не пользуется при назначении относительных размеров пятна контакта в паре с измерительным колесом, сама трактовка этого требования применительно к планетарным передачам некорректна. При перекосе осей зубчатых колес выход на кромку пятна контакта будет происходить быстрее именно для случая увеличенного пятна контакта при оценке этого пятна контакта при неподвижных осях, что имеет место при контроле с измерительным колесом.

Во-вторых, по ГОСТ 1643–81 (табл. 12, примечание 2) указано: «*Если не указаны специальные требования по нагрузке (торможению) зубчатой передачи, пятно контакта устанавливается при легком торможении, обеспечивающем непрерывное контактирование зубьев обоих зубчатых колес*», то при

использовании приборов двухпрофильного контроля никакого торможения не имеется.

В-третьих, измерительные колеса для двухпрофильного контроля проектируются с параметрами, существенно отличающимися от параметров парного зубчатого колеса, что может приводить к различной форме пятна контакта по высоте зуба.

В качестве подтверждения вышеприведенного анализа по выбору параметров контакта на рисунке приведены пятна контакта плавающей солнечной шестерни с модулем 10, числом зубьев 22, изготовленной по степени точности 7-8-7 с зубошлифованием, и сателлита с модулем 10, числом зубьев 29, изготовленного по степени точности 8-8-7 с зубошлифованием, из планетарной передачи схемы 2К-Н после эксплуатации.



Зоны контакта с питтингом солнечной шестерни (а) и сателлита (б) планетарной передачи схемы 2К-Н

Хотя солнечная шестерня и сателлит были изготовлены с использованием зубошлифования, прошли контроль на контрольно-измерительном центре и по нормам контакта соответствовали допуску на направление зуба F_{β} по 7-й степени точности ГОСТ 1643–81, суммарные пятна контакта в передаче имели выход на кромку зуба, и фактическая относительная длина пятна контакта была не более 10-15 %.

При перекосах осей солнечных шестерен и сателлитов под нагрузкой нормы контакта по ГОСТ 1643–81 неприемлемы и должны уточняться. Вместо стандартных норм погрешности направления зуба должна применяться продольная модификация зуба [3–6]. В зависимости от условий работы передачи можно использовать различные формы модификации; современные зубообрабатывающие станки с ЧПУ позволяют выполнить практически любую заданную конструктором форму продольной модификации профиля зуба [7].

Для назначения норм пятна контакта зубчатых колес планетарных передач наиболее правильным является использование суммарного пятна контакта в формулировке «*суммарное пятно контакта как часть активной боковой поверхности зуба зубчатого колеса, на которой располагаются следы прилегания зубьев парного зубчатого колеса в собранной передаче после вращения под нагрузкой, устанавливаемой конструктором*».

Пункт ГОСТ 1643–81 «2.3.3. Допускается оценивать точность зубчатого колеса по суммарному или мгновенному пятну контакта его зубьев с зубьями измерительного колеса» не должен использоваться применительно к зубчатым колесам планетарных передач, имеющих подвижные рабочие оси.

Целесообразно применительно к зубчатым колесам планетарных передач использовать положения немецких стандартов DIN 3962 по разделению общей погрешности профиля (F_f – Profil-Gesamtabweichung) и общей погрешности контактной линии (F_β – Flankenlinien-Gesamtabweichung) на погрешности угла и погрешности формы. Отметим, что в стандартах DIN 3962 пятно контакта оценивается в собранной передаче под нагрузкой (TRA – Tragbild).

Следует заметить, что большинство предприятий, занимающихся изготовлением планетарных зубчатых передач, оснащено зарубежными координатно-измерительными центрами, которые обеспечивают измерение зубчатых колес в системе стандартов DIN, однако из результатов этих измерений используются только суммарные погрешности направления и профиля зуба по ГОСТ 1643–81.

Заключение

1. Использование положений ГОСТ 1643–81 к формулировкам норм пятна контакта следует проводить с учетом особенностей конструкции планетарных передач.

2. Наиболее целесообразным для достижения расчетного ресурса является требование обеспечения суммарного пятна контакта как части активной боковой поверхности зуба зубчатого колеса, на которой располагаются следы прилегания зубьев парного зубчатого колеса в собранной передаче после вращения под нагрузкой, устанавливаемой конструктором.

3. Для отработки суммарного пятна контакта в собранной передаче требуется проведение комплекса исследований по разработке модификаций

зубьев и технологического обеспечения их изготовления и контроля.

4. При отработке суммарного пятна контакта целесообразно использование параметров погрешности направления и погрешности профиля зуба из стандартов DIN 3962.

5. Обеспечение суммарного пятна контакта в собранной планетарной передаче может осуществляться контролем параметров модификации и специальных пятен контакта при контроле отдельных пар «солнечная шестерня – сателлит» и «сателлит – коронная шестерня» под нагрузкой или контролем суммарного пятна контакта в собранной планетарной передаче на специальных стендах с нагрузкой и возможностями фиксации пятна контакта.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ 1643–81. (СТ СЭВ 641–77, СТ СЭВ 643–77 и СТ СЭВ 644–77). Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 46 с.
2. Toleranzen für Stirnradverzahnungen. Toleranzen für Flankenlinienabweichungen. DIN 3962. Teil 2.
3. Особенности продольной модификации зубчатых колес планетарных передач типа 2К-Н / В. Е. Антонюк [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2010. – № 3(12). – С. 28–32.
4. Напряженно-деформированное состояние деталей планетарного редуктора схемы 2К-Н / В. Е. Антонюк [и др.] // Автомобильная промышленность. – 2011. – № 7. – С. 21–25.
5. Продольная модификация зубчатых передач мобильных машин / В. Е. Антонюк [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 4(17). – С. 37–41.
6. Антонюк В. Е., Поддубко С. Н., Русецкий В. Н. Параметры двухпрофильного контроля при селективной сборке сателлитов планетарных передач схемы 2КН // Труды НАМИ : сборник. – М. : НАМИ, 2015. – Вып. 261. – С. 101–117.
7. Особенности конструкции и технологии изготовления модифицированных зубчатых колес / В. Е. Антонюк [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 3(16). – С. 14–18.

Получено 11.01.2017

УДК 621.396.6

В. В. Козлов, доктор технических наук, профессор, Черноморское ВВМУ имени П. С. Нахимова, Севастополь

Т. В. Зонтова, кандидат технических наук, Черноморское ВВМУ имени П. С. Нахимова, Севастополь

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПЕРВОГО ЭТАПА МЕХАНИЗМА БЫСТРОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ

Введение

Формирование мощных электромагнитных излучений (МЭМИ) наносекундной длительности возможно путем применения быстрого механизма электрического взрыва к проводникам. Анализ результатов экспериментальных исследований, проведенных в работах [1, 2], показал, что дан-

ный механизм реализуется при плотностях тока $j \approx 10^7$ А/см² для электровзрывающихся проводников (ЭВП) диаметром $a_0 \leq 0,1$ мм. Указанными параметрами генерируемого тока обладает спиральный взрывомагнитный генератор (СВМГ), в качестве нагрузки которого и можно использовать ЭВП.