УДК 621.833

Т. В. Савельева, инженер-конструктор
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СПИРОИДНОЙ ПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ УНИФИЦИРОВАННОГО ЗУБОРЕЗНОГО ИНСТРУМЕНТА

Рассмотрены вопросы проектирования спироидной передачи на основе унифицированного инструмента. Обозначены особенности назначения параметров рабочего и станочного зацеплений при заданном производящем червяке. Описаны дефекты, возникающие при синтезе локализованного контакта. Указано влияние изменения варьируемых параметров на степень локализации контакта и эксплуатационные характеристики передачи.

Ключевые слова: спироидные передачи, проектирование, унификация спироидных фрез, локализованный контакт

Введение

Вредное влияние погрешностей изготовления и сборки, а также деформаций зубьев звеньев передачи можно эффективно компенсировать путем локализации пятна контакта в центре зуба. Подход к проектированию спироидной передачи на основе унификации зуборезного инструмента [1] усложняет решение задачи синтеза локализованного контакта, так как параметры инструмента оказываются жестко заданными, поэтому для обеспечения параметров спироидной фрезы варьируют параметры червяка и параметры установки фрезы. В данной статье рассматривается влияние выбора этих параметров на степень локализации контакта и некоторые эксплуатационные характеристики в цилиндрической ортогональной спироидной передаче.

Основные положения методики проектирования

Основные параметры спироидной передачи определяются на этапах синтеза сопряженного зацепления и синтеза локализованного контакта (синтеза станочного зацепления).

На этапе синтеза сопряженного (рабочего) зацепления выбираются параметры схемы передачи и витка червяка и производится оценка передачи по ряду критериев: нагрузочной способности, КПД, коэффициенту перекрытия, силам, действующим в зацеплении, и др. Основные параметры рабочего зацепления показаны на рис. 1, их обозначения и наименования соответствуют ГОСТ 22850–77. К числу этих параметров относятся: межосевые угол Σ и расстояние a_w, внешний и внутренний диаметры колеса d_{e2} и d_{i2}, число заходов червяка z_1, число зубьев колеса z_2, диаметр вершин витков червяка d_{a1}, осевой модуль m_{x1}, коэффициенты высоты головки h_{a1}*, ножки h_{f1}*, радиального зазора c_1* и толщины витка S_1* червяка, радиусы кривизны профиля витка червяка ρ_{L1} и ρ_{R1}, углы профиля червяка в нормальном сечении α_{nL1} и α_{nR1}.

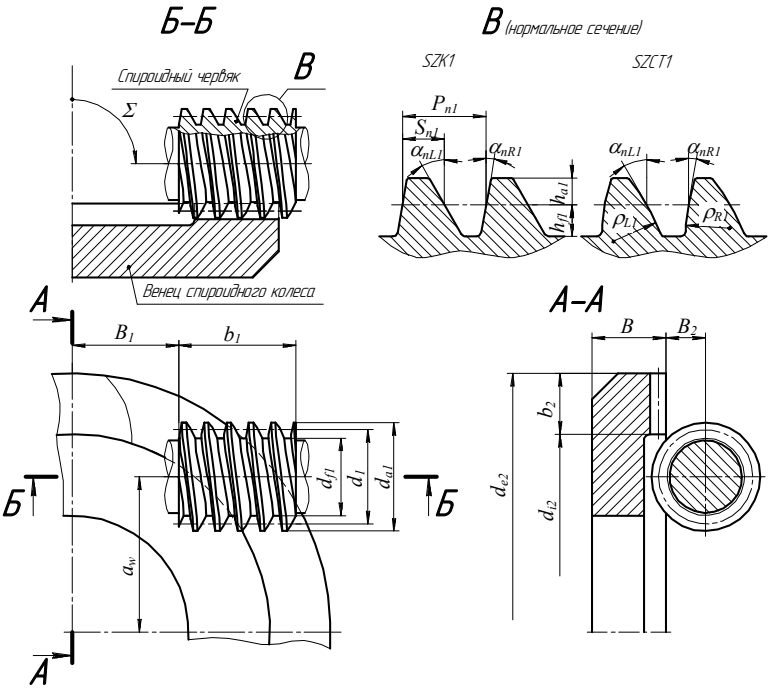


Рис. 1. Основные параметры спироидной передачи [2]

© Савельева Т.В., 2012

В процессе синтеза локализованного контакта (синтеза станочного зацепления) поверхности спироидного колеса придается модификация путем задания параметров формообразования зубьев спироидного колеса.

Перечни параметров станочного и рабочего зацеплений аналогичны. При традиционной постановке задачи проектирования спироидной передачи, реализуемой по второму принципу Оливье [3] (когда рабочий и производящий червяки идентичны друг другу), эти параметры практически совпадают. При использовании метода расчета параметров станочного зацепления с геликоидной производящей поверхностью [4] параметры геометрии, установки и движения рабочего и производящего червяков могут отличаться. В этом методе часть параметров станочного зацепления задается (станочный межосевой угол Σ_0, модуль m_{x0} и число заходов z_0, радиусы кривизны профиля ρ_{L0} и ρ_{R0} производящего червяка, положение расчетных точек на поверхности зуба колеса), а часть определяется исходя из условия первого порядка сопряжения поверхностей зуба в расчетных точках (группа *расчетных параметров* – станочное межосевое расстояние a_{w0} и параметры производящего червяка – диаметр вершин витков d_{a0}, коэффициент толщины витка S_0*, углы профиля α_{L0} и α_{R0}). На данном этапе оценка передачи производится по полю модификаций.

В рассматриваемой постановке – при соблюдении условия применения заданного инструмента – часть параметров наладки оказывается известной заранее. Это параметры геометрии производящего червяка (m_{x0}, z_0, ρ_{L0}, ρ_{R0}, d_{a0}, S_0*, α_{L0} и α_{R0}). В таком случае для обеспечения локализованного контакта в передаче недостаточно варьировать только оставшимися параметрами станочной наладки (тем более что часть из них относится к расчетным), возникает необходимость возвращаться к этапу синтеза сопряженного зацепления и изменять его параметры, одноименные по отношению к заданным, и процесс проектирования принимает итерационный характер. В этом случае выбор параметров рабочего (сопряженного) и станочного зацеплений должен быть подчинен одновременно двум условиям – обеспечения высоких эксплуатационных характеристик и приемлемой локализации. Вопросу о том, как влияет изменение параметров на характеристики сопряженной передачи и на локализованный контакт в ней, и посвящена данная работа.

Влияние некоторых параметров передачи на локализацию контакта и эксплуатационные показатели

Следует отметить, что, оценивая степень локализации контакта в спироидной передаче, часто ориентируются на предельные значения модификаций на границах активной части зуба колеса [5]. Профильная модификация поверхностей в примененном методе обеспечивается простым и единственным приемом – заданием разных радиусов кривизны профиля рабочего и производящего червяков. Продольная модификация поверхностей, которая достигается изменением комплекса других варьируемых параметров, представляет главный интерес в исследовании локализованного контакта. Исходя из практики расчетов, предельные величины продольной модификации не должны превышать величины $0{,}05(m_{x1})^{1/2}$ [6].

Выполненные численные исследования показали, что продольная локализация контакта может быть обеспечена:

– увеличением Σ_0 относительно Σ, причем большее изменение приводит к большей степени локализации контакта по обеим поверхностям;

– увеличением m_{x1} относительно m_{x0}, и, чем меньше это увеличение, тем больше степень локализации по левой поверхности и меньше – по правой;

– уменьшением m_{x1} относительно m_{x0} (при $z_0 = z_1$ и $d_{a0} < d_{a1}$), причем чем больше это уменьшение, тем больше степень локализации контакта по левой поверхности и больше степень мостового контакта по правой.

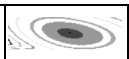
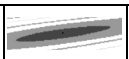
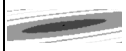
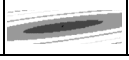
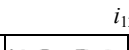
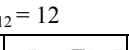
Опыт проектирования спироидных передач позволяет сформулировать рекомендации по выбору первого приближения параметров m_{x1} и Σ_0, а также α_{nL1} и α_{nR1}, которые сведены в табл. 1.

Выбор параметров m_{x1} и Σ_0 не является однозначным – добиться совпадения расчетных и заданных параметров инструмента можно при разных их сочетаниях (см. табл. 2). В табл. 2 рассмотрены два случая положения полюсной точки – ближе к межосевой линии передачи ($z_2 = 35$, $i_{12} = 11{,}67$, передачи № 1–3) и дальше от межосевой линии ($z_2 = 36$, $i_{12} = 12$, передачи № 4–6). Для каждой передачи указаны поля модификаций, значения модификаций на границах активной части зуба, а также эксплуатационные характеристики: КПД, коэффициент перекрытия ε, момент на выходном валу по пластическим контактным деформациям T_{2P}.

Таблица 1. **Некоторые рекомендации по выбору параметров передач и станочных наладок**

z_1	z_0	$\Sigma_0 - \Sigma$, °	$(m_{x1} - m_{x0})/m_{x0}$	$\alpha_{nL0} - \alpha_{nL1}$, °	$\alpha_{nR0} - \alpha_{nR1}$, °
1	1	0…+0,3	–0,003…0	–0,01…+0,15	–0,1…+0,4
2	1	+0,4…+1,1	–0,002…+0,010	+0,15…+0,70	+0,6…+1,7
3	1	+1,0…+1,7	+0,009…+0,015	+0,80…+1,70	+2,6…+4,3
3	2	+1,0…+1,7	0…+0,019	+1,00…+2,00	+1,9…+3,1
4	2	+1,1…+2,9	+0,005…+0,031	+1,80…+3,50	+3,1…+6,2

Таблица 2. **Влияние изменения параметров на характеристики передачи с a_w = 40 мм; z_1 = 3 на основе фрезы с m_{x0} = 2,75 мм; z_0 = 1; α_{nL0} = 30°; α_{nR0} = 10°**

№	m_{x1}, мм	Σ_0, °	$\alpha_{nL1}/\alpha_{nR1}$, °	h_{a1}^*/h_{f1}^*	Поле модификаций на развертке зуба		Модификация, мкм		КПД$_L$/КПД$_R$, %	$\varepsilon_L/\varepsilon_R$	T_{2PL}/T_{2PR}, Нм
					L	*R*	по высоте/ по длине *L*	по высоте/ по длине *R*			
i_{12} = 11,67											
1	2,770	91,82	29,03/ 6,84	0,91/ 1,11			36/42	24/5	68,74/ 72,36	2,67/ 3,00	5133/ 1482
2	2,774	91,42	29,18/ 7,42	0,94/ 1,14			38/28	28/6	68,86/ 72,44	2,67/ 3,00	5165/ 1488
3	2,777	91,16	29,28/ 7,82	0,95/ 1,15			39/13	31/6	68,93/ 72,47	2,67/ 3,00	5197/ 1491
i_{12} = 12											
4	2,769	92,04	29,18/ 6,96	0,80/ 1,00			31/99	21/5	69,06/ 71,82	2,50/ 3,00	3913/ 1547
5	2,772	91,73	29,28/ 7,39	0,82/ 1,02			32/70	24/6	69,12/ 71,89	2,50/ 3,00	4019/ 1552
6	2,775	91,42	29,39/ 7,81	0,83/ 1,03			33/30	27/7	69,18/ 71,93	2,50/ 3,00	4084/ 1589

Примечание: *L* – для левых боковых поверхностей, *R* – для правых боковых поверхностей.

Анализ данных, полученных в результате численных исследований спироидных передач, основанных на применении заданного инструмента, позволил сделать следующие выводы:

1. Изменение параметров m_{x1} и Σ_0 и положение полюсной точки мало влияют на степень продольной модификации по правой боковой поверхности и позволяют легче управлять степенью локализации контакта по левой боковой поверхности, что благоприятно с точки зрения бóльшей чувствительности этой поверхности к влиянию погрешностей.

2. Смещение полюсной точки дальше от межосевой линии (что соответствует выбору бóльших значений z_2 из возможных для конкретной передачи и конкретного заданного инструмента) приводит к увеличению переходного участка на зубе колеса, вследствие этого возрастают значения продольной модификации (и в некоторых случаях превышают допустимую величину $0{,}05(m_{x1})^{1/2}$) по левой поверхности со стороны выхода червяка из зацепления. С точки зрения более плавной работы передачи лучше, когда, напротив, модификации больше со стороны входа витков червяка в зацепление, что уменьшает опасность кромочного контакта в этом месте.

При смещении полюсной точки ближе к межосевой линии переходные участки на зубе меньше, поле модификаций практически симметрично по длине зуба.

3. Для передач с одним и тем же значением i_{12} можно регулировать степень продольной локализации по левой поверхности, изменяя модуль рабочего червяка m_{x1} одновременно с изменением Σ_0: чем сильнее увеличение m_{x1} по отношению к m_{x0}, тем меньше степень локализации контакта, при этом большее увеличение m_{x1} относительно m_{x0} требует меньшего увеличения угла Σ_0 по сравнению с Σ.

4. При большом увеличении станочного межосевого угла Σ_0 относительно межосевого угла передачи Σ (как правило, 0,5° и больше) фреза в бóльшей степени углубляется в «тело» венца колеса на пятке его зуба (рис. 2), и чтобы высоты зуба выбранной фрезы было достаточно для получения полного профиля зуба колеса, приходится уменьшать коэффициенты высоты h_{a1}^* и h_{f1}^*.

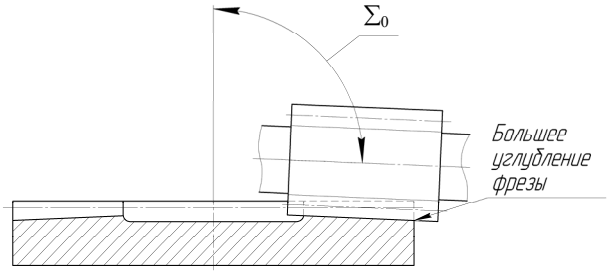


Рис. 2. Углубление фрезы на пятке зуба колеса

Таким образом, условие применения заданного инструмента в спироидных передачах с многозаходными червяками вынуждает несколько «жертвовать» высотой витка (обычно не более, чем на 3–10 %), а следовательно, и нагрузочной способностью передачи. Это продемонстрировано в табл. 2: в пределах одного и того же i_{12} при увеличении коэффициентов высоты h_{a1}^* и h_{f1}^* возрастают значения и КПД, и T_{2P} (для рядов передач № 1–3 и № 4–6).

5. Эксплуатационные характеристики (КПД, ε и T_{2P}) для различных передач с одинаковыми a_w и z_1 меняются незначительно (в диапазоне 5–7 %). В пределах одного положения полюсной точки (одного i_{12} и z_2) при увеличении модуля m_{x1} относительно m_{x0} значения КПД и T_{2P} увеличиваются, а величины ε обычно остаются неизменными. При смещении полюсной точки дальше от межосевой линии КПД по левой поверхности и T_{2PR} увеличиваются, а КПД по правой поверхности и T_{2PL} уменьшаются; также уменьшает-

ся и коэффициент перекрытия ε. Таким образом, влияние выбора параметров на эксплуатационные характеристики противоречиво.

6. При синтезе локализованного контакта на поверхностях зубьев могут возникать следующие дефекты, которых следует избегать [7]:

– подрезание – см. рис. 3, *а* (при $z_0 = z_1$ и $d_{a0} > d_{a1}$, исключается изменением z_2 или (и) m_{x1}, Σ_0);

– большой переходный участок на зубе – см. рис. 3, *б* (для $z_1 > 1$ может быть уменьшен смещением полюсной точки спироидной передачи в направлении ближе к межосевой линии, т. е. уменьшением z_2, а также смещением расчетной точки на зубе колеса к носку);

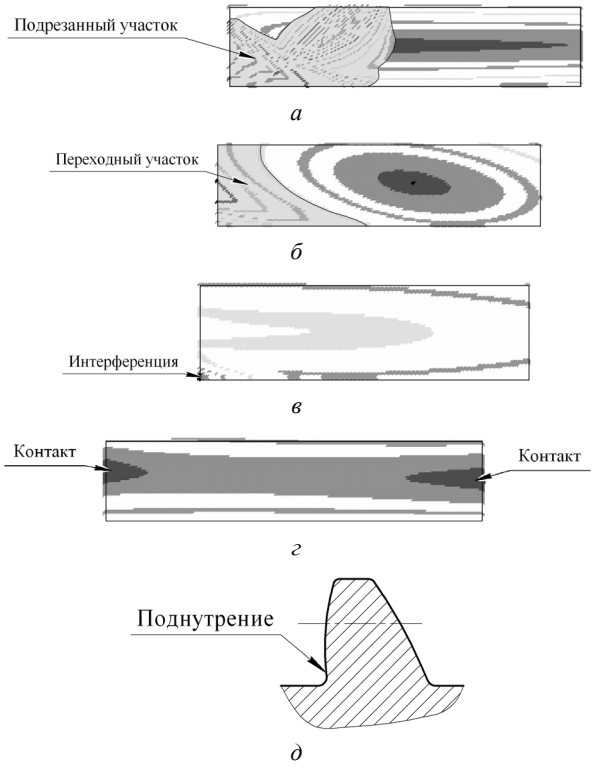


Рис. 3. Дефекты при синтезе локализованного контакта

– интерференция на переходном участке зуба – см. рис. 3, *в* (исключается углублением фрезы в тело колеса, т. е. увеличением c_0*);

– мостовой контакт – см. рис. 3, *г* (возникает при $z_0 = z_1$ и $d_{a0} < d_{a1}$, его следует ограничить величиной $0{,}01(m_{x1})^{1/2}$);

– поднутрение поверхности – см. рис. 3, *д* (следует выбирать меньший Σ_0).

Заключение

Выполненное исследование показало, что при проектировании передачи на основе применения унифицированного производящего червяка следует одновременно учитывать и эксплуатационные показатели, и показатели локализованного контакта, и возникающие в зацеплении дефекты. Как правило, обеспечение локализованного контакта и исключение дефектов на поверхности зуба имеют приоритетный характер вследствие того, что изменение эксплуатационных характеристик сравнительно невелико и противоречиво.

Библиографические ссылки

1. *Goldfarb, V. I., Trubachev, E. S., Savelieva, T. V.* Unification of the hobs in spiroid gears // International Conference on Gears. Europe invites the World. Sept. 14th to 16th, 2005. – Garching near Munich, Germany, 2005. – Pp. 1755-1759.

2. Спироидные редукторы трубопроводной арматуры : моногр. / В. И. Гольдфарб [и др.] ; ред. В. И. Гольдфарб. – М. : Вече, 2011. – 222 с.

3. *Литвин Ф. Л.* Теория зубчатых зацеплений. – М. : Наука, 1968. – 584 с.

4. *Трубачев Е. С.* Основы анализа и синтеза зацепления реальных спироидных передач : дис. ... д-ра техн. наук. – Ижевск, 2004. – 348 с.

5. Там же.

6. Спироидные редукторы трубопроводной арматуры.

7. *Трубачев Е. С.* Основы анализа и синтеза зацепления реальных спироидных передач.

* * *

T. V. Savelyeva, Design Engineer, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Peculiarities of spiroid gear design based on unified gear-cutting tools

The questions of the spiroid gear design on the basis of unified tools are considered. Peculiarities of parameters' assigning in working and operating meshing are designated for a given generating worm. Defects of localized contact are described. The influence of variable parameters' change on a degree of contact localization and operational characteristics is indicated.

Keywords: spiroid gear, design, unification of spiroid hobs, localized contact

Получено: 19.11.12