

Влияние погрешности обката гибкого колеса на кинематическую погрешность ВЗП-80

77-30569/306686

01, январь 2012

Люминарский С. Е.

УДК 621.833

МГТУ им. Н.Э. Баумана

katjstas@mail.ru

Кинематическую погрешность $F_{кин}$ волновых зубчатых передач вызывают три основные причины.

1. Деформация гибкого колеса (ГК). При абсолютно точном изготовлении всех деталей передачи деформация ГК вызывает собственную кинематическую погрешность $F_{кин}^c$. Для передачи ВЗП-80 эта погрешность изменится в пределах от 0.05 до 0.4 мкм (от 0.25 до 2 угл. сек) в зависимости от нагрузки [2].

2. Радиальные колебания кулачка, вызванные неточностью изготовления деталей передачи. Для передачи ВЗП-80 с деталями, изготовленными по 8...9 квалитетам точности, при использовании фланцевого двигателя повышенной точности $F_{кин}$ изменяется в пределах от 1.2 до 4 угл. мин. при работе на холостом ходу [1]. При использовании дополнительного упругого элемента в конструкции кулачка кинематическая погрешность снизится, а при использовании самоустанавливающегося кулачка погрешность установки кулачка не оказывает влияния на кинематическую погрешность передачи.

3. Погрешности изготовления зубчатых колес.

В кинематической погрешности зубчатого колеса можно выделить две составляющие.

Первая составляющая вызвана смещением рабочей оси относительно базовой оси. Базовая ось обычно совпадает с технологической осью, т.е. осью, относительно которой

зубчатое колесо вращается при чистовой обработке на станке. Эта составляющая учитывается при расчете радиальных колебаний кулачка.

Вторая составляющая кинематической погрешности зубчатого колеса вызвана кинематической погрешностью цепи деления зубообрабатывающего станка. Она характеризуется погрешностью обката F_{cr} по ГОСТ 9178-81 или накопленной погрешностью шага колеса F_{pr} по ОСТ 5.8686-84 при совпадении базовой и технологической осей колеса.

В волновой передаче гибкое колесо (ГК) касается жесткого колеса (ЖК) кромками зубьев. Кромочный контакт приводит к тому, что на $F_{крм}$ оказывает влияние радиальное биение поверхности вершин зубьев ГК F_{rdar} (ОСТ 5.8686-84). В данной статье это влияние не рассматривается.

В предлагаемой работе рассматривается влияние погрешности шага гибкого колеса F_{pr} на кинематическую погрешность передачи F_{ior} . Параметры рассматриваемой передачи имеют следующие значения: $Z_g = 200, Z_b = 202, x_b = 3.32, N = 24$ (число тел качения в гибком подшипнике). Остальные параметры приведены в работе [2]. При определении кинематической погрешности волновая передача представляется упругой системой с односторонними связями. Методика расчета приведена в работе [1].

Погрешность положения рабочего профиля зубчатого колеса можно выразить через погрешность углового положения зуба. Разность между действительным и номинальным положениями зуба в первом приближении можно представить в виде

$$\Delta\Phi_{gi} = \frac{2F_{pr}}{d_g} \cdot \cos(\Phi_{gi}), \quad (1)$$

где F_{pr} – накопленная погрешность шага ГК; d_g – диаметр делительной окружности ГК; Φ_{gi} – угловая координата зуба ГК.

В обычной прямозубой зубчатой передаче погрешность F_{pr} не влияет на боковой зазор в зацеплении. В волновой передаче погрешность расположения зубьев F_{pr} приводит к изменению деформации ГК и, следовательно, изменяет боковые зазоры. На рис. 1 приведены графики изменения гарантированного бокового зазора в передаче ВЗП-80 при

нулевой нагрузке, полученные расчетным путем. Из анализа графиков можно сделать следующие выводы.

1. Чем больше накопленная погрешность шага F_{pr} , тем меньше гарантированный боковой зазор J_{nmin} .
2. Чем больше коэффициент смещения гибкого колеса x_g , тем меньше боковой зазор J_{nmin} .
3. Коэффициент смещения x_g , необходимый для создания предварительного натяга в зацеплении, зависит от накопленной погрешности шага F_{pr} .

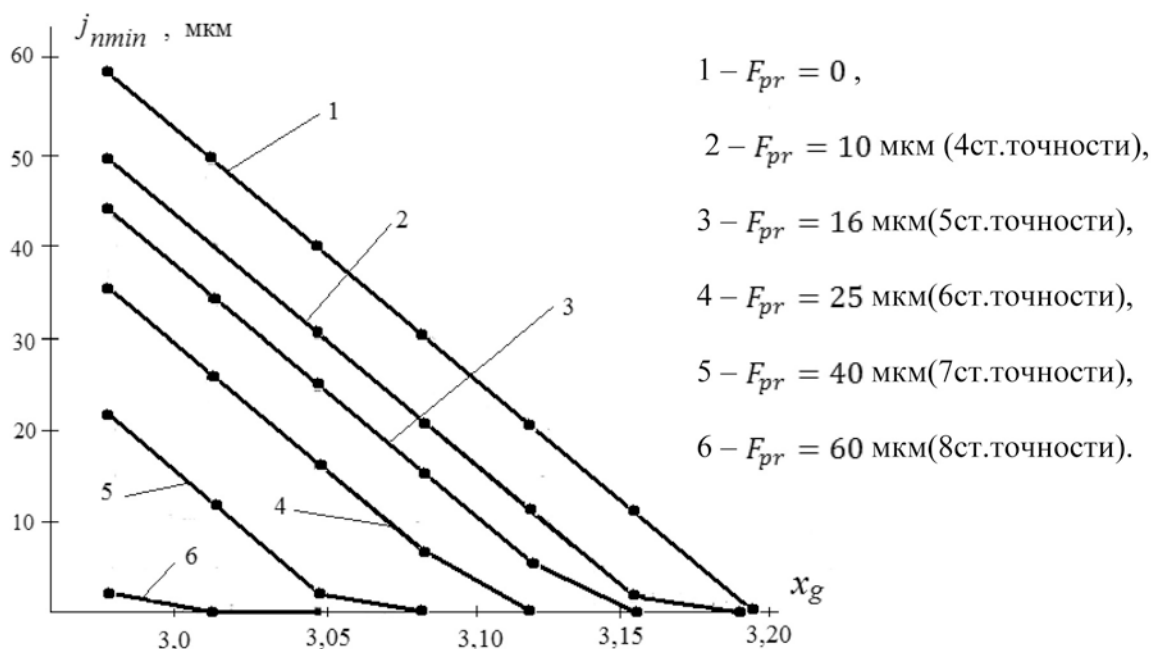


Рис. 1. Боковой зазор в зацеплении

С увеличением нагрузки действительный боковой зазор будет увеличиваться. Основными причинами этого увеличения являются контактная и изгибная деформации зубьев гибкого и жесткого колес, изгиб оболочки гибкого колеса. На рис. 2 представлены графики зависимостей гарантированного бокового зазора J_{nmin} от нагрузки при изготовлении ГК по 8 ст. точности для двух значений коэффициентов смещения $x_g = 3.119$ и $x_g = 3.154$. Из этих рисунков видно, что в диапазоне нагрузок $M_g = 1 \dots 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ гарантированный боковой зазор J_{nmin} резко увеличивается, что связано с контактной и изгибной деформацией зубьев, а также с деформацией оболочки ГК.

Начиная с момента $M_g = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$, боковой зазор растет значительно медленнее. Это объясняется тем, что зубья ГК и ЖК, между которыми расположен минимальный боковой зазор, начинают касаться друг друга по рабочим поверхностям.

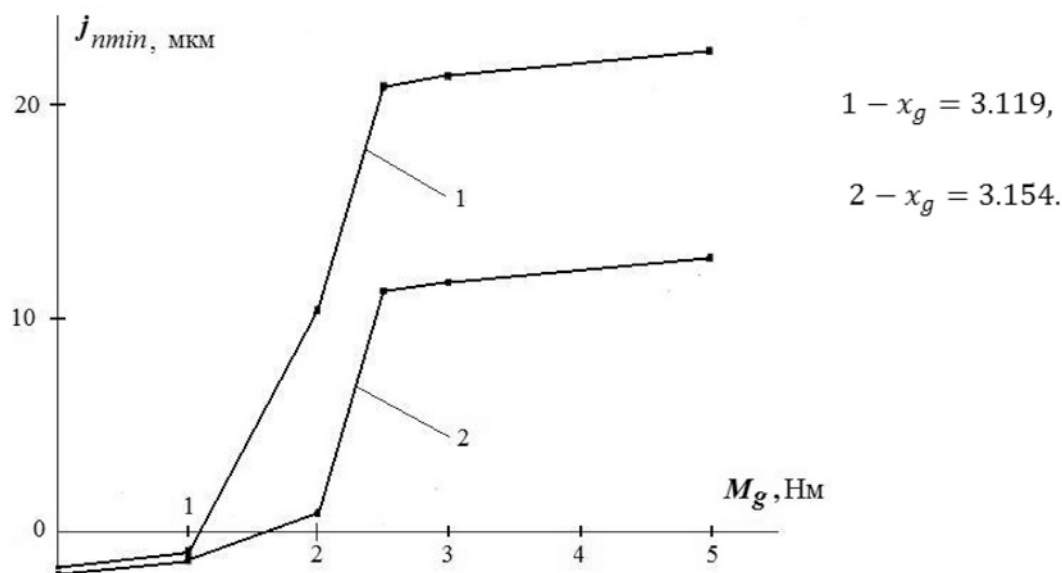


Рис. 2. Зависимость бокового зазора от момента сопротивления

На рис. 3 приведены графики зависимостей наибольшей кинематической погрешности F_{ior} ВЗП-80 от коэффициента смещения ГК при нулевой нагрузке. Как видно из приведенных рисунков с уменьшением коэффициента смещения гибкого колеса x_g кинематическая погрешность F_{ior} увеличивается до некоторого значения. Дальнейшее уменьшение x_g не изменяет F_{ior} . Рассмотрим механизм возникновения таких зависимостей.

Положение зуба ГК определяется зависимостью (1). Из этой зависимости видно, что если зуб, находящийся на большой оси кулачка, опережает свое номинальное положение, то зуб, находящийся на большой оси кулачка в противоположной зоне зацепления, отстает от своего номинального положения на ту же величину. Поэтому при отсутствии бокового зазора ($J_{min} = 0$) сила, действующая на зуб ГК в одной зоне зацепления, равна по величине силе, действующей на зуб в противоположной зоне зацепления. Одна сила создает момент, направленный в одну сторону, другая сила – в другую сторону. Следовательно, при $J_{min} = 0$ деформация зубьев не влияет на положение ГК. Незначительное изменение этого положения происходит из-за деформации оболочки гибкого колеса.

При наличии бокового зазора кинематическая погрешность F_{ior} будет расти до тех пор, пока боковой зазор полностью не закроется. Например, при $x_g = 3.12$ боковой зазор полностью закрывается при $F_{pr} = 25$ мкм (см. рис.1). При этом значении коэффициента смещения x_g прекращается рост кинематической погрешности F_{ior} (см. рис. 3).

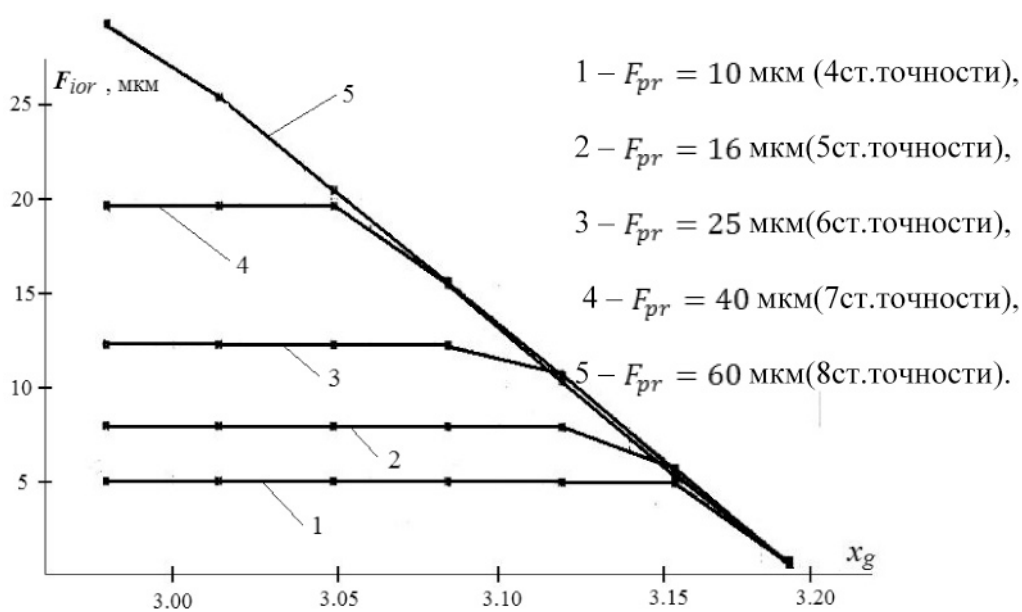


Рис. 3. Кинематическая погрешность ВЗП-80 ($M_g=0$)

На рис. 4 представлены графики изменения кинематической погрешности $F_{кит}$ в зависимости от угла поворота гибкого колеса φ_g при нулевой нагрузке и 4-ой степени точности ГК. Из этих графиков видно, что $F_{кит}$ имеет периодический характер. Период колебаний кинематической погрешности равен времени поворота гибкого колеса на угол 180° относительно кулачка, что соответствует углу поворота ГК относительно ЖК на угол $\frac{180^\circ}{(U+1)}$.

Кинематическая погрешность при повороте кулачка растет до некоторого значения (см. рис. 4). Горизонтальные участки рассматриваемых зависимостей соответствуют нулевому значению бокового зазора. Например, при $x_g = 3.154$ боковой зазор J_{min} близок к нулю (см. рис. 1, кривая 2), а наибольшая кинематическая погрешность передачи $F_{ior} = 5$ мкм (см. рис. 3, кривая 1). При этом же значении x_g максимальное значение кинематической погрешности $F_{кит} = 5$ мкм (рис. 4, кривая б).

На рис. 5 приведены графики зависимостей кинематической погрешности F_{ior} от коэффициента смещения x_g при различных нагрузках. Из представленных графиков видно, что с ростом нагрузки кинематическая погрешность F_{ior} уменьшается. Рассмотрим причины появления представленных зависимостей.

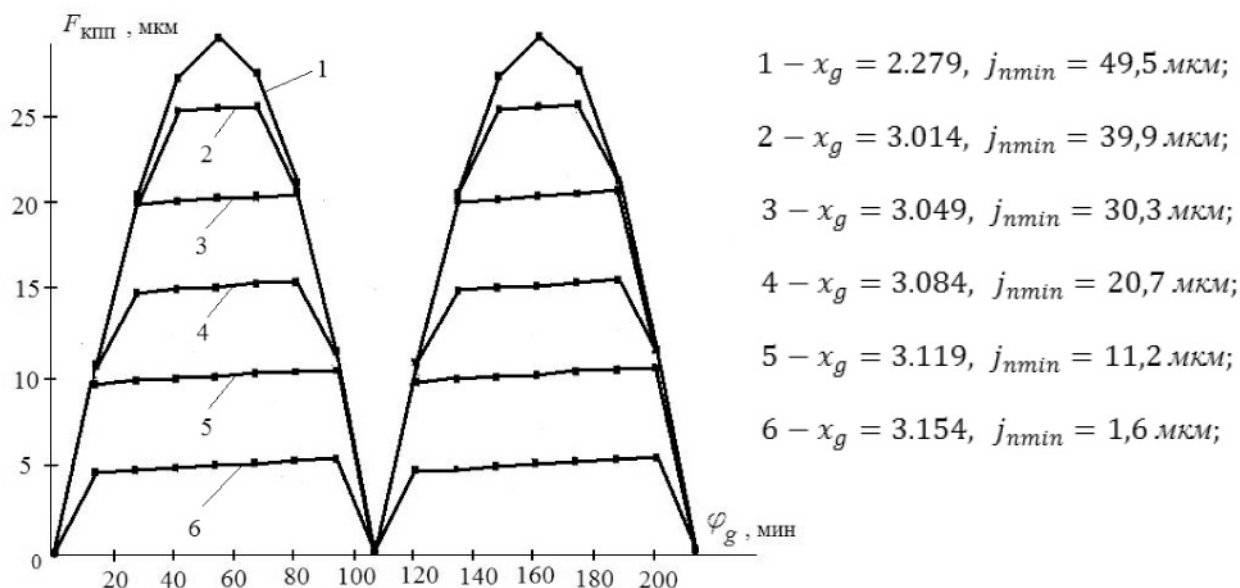


Рис. 4. Кинематическая погрешность ВЗП-80 ($M_g = 0$, 4 ст. точности ГК)

С ростом нагрузки увеличиваются контактные деформации зубьев в обеих зонах зацепления. При номинальных размерах гибкого колеса эти деформации в обеих зонах зацепления одинаковые. При наличии погрешности изготовления гибкого колеса F_{pr} в одной зоне зацепления контактные деформации увеличиваются, а в другой уменьшаются. Следовательно, если бы контактные деформации линейно зависели от нагрузки, то изменение этих деформаций с появлением погрешности F_{pr} не оказывало влияние на положение ГК. Нелинейный характер контактных деформаций приводит к небольшому изменению положения ГК с ростом F_{pr} .

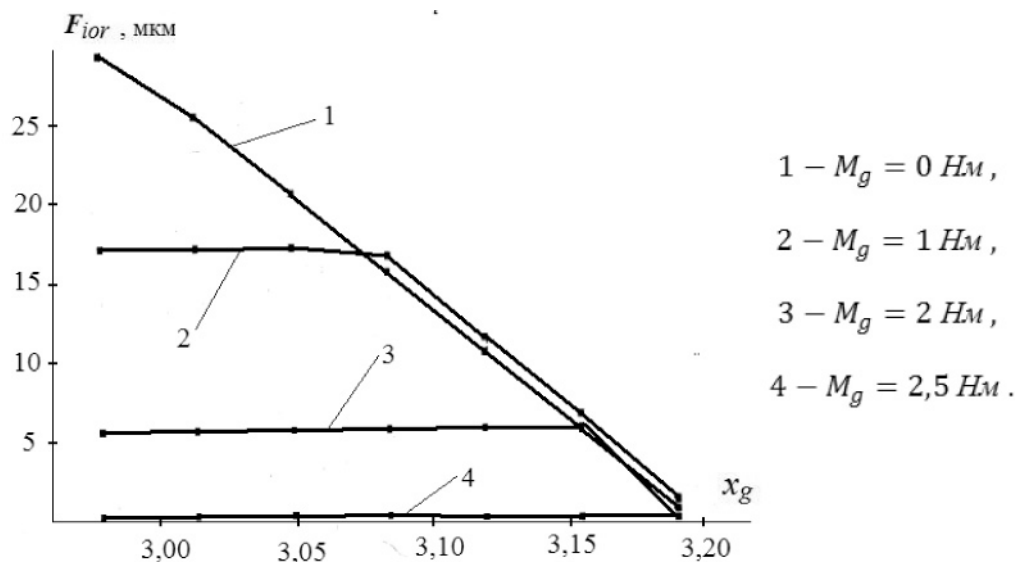


Рис. 5. Кинематическая погрешность ВЗП-80 (8 ст. точности ГК)

Если накопленная погрешность шага гибкого колеса имеет большие значения, то при небольших нагрузках зубья в одной из зон зацепления могут полностью выйти из зацепления. Это при наличии бокового зазора может привести к значительному росту кинематической погрешности передачи F_{ior} , т.к. с ростом F_{pr} увеличение контактных деформаций в одной зоне зацепления не будет компенсироваться уменьшением контактных деформаций в другой зоне зацепления.

Если при заданной нагрузке боковой зазор равен нулю (передача собрана с натягом), то после выхода из зацепления зуба по рабочей кромке он входит в зацепление по нерабочей кромке. Поэтому в этом случае выход из зацепления зубьев в одной зоне зацепления не приведет к существенному изменению F_{ior} .

С уменьшением x_g уменьшается толщина зубьев и, следовательно, возрастает боковой зазор. Поэтому при уменьшении x_g кинематическая погрешность передачи возрастает. Рост кинематической погрешности происходит только до некоторого значения, начиная с которого F_{ior} остается постоянной (см. рис. 5). Этот рост объясняется наличием бокового зазора. В этом случае зубья ГК и ЖК не касаются друг друга по нерабочим кромкам. Например, при $M_D = 2 \text{ Нм}$ (см. рис. 5) F_{ior} возрастает при уменьшении x_g до 3.154. При этих же значениях нагрузки и коэффициента смещения x_g гарантированный боковой зазор близок к нулю (см. рис. 2).

На рис. 6 приведен график зависимости кинематической погрешности F_{ior} от нагрузки при $x_g = 3.154$ и 8-ой степени точности изготовления ГК. Момент на гибком колесе изменяется от 5 до 100 Нм. В этом диапазоне нагрузок боковые зазоры не оказывают влияния на кинематическую погрешность передачи, так как зубья ГК и ЖК взаимодействуют по рабочим и нерабочим поверхностям. В данном случае основными причинами, вызывающими кинематическую погрешность, являются нелинейность контактных деформаций зубьев и изгибная деформация оболочки ГК. Колебательный характер представленной зависимости объясняется изменением количества тел качения, взаимодействующих с наружным кольцом подшипника, при увеличении нагрузки.

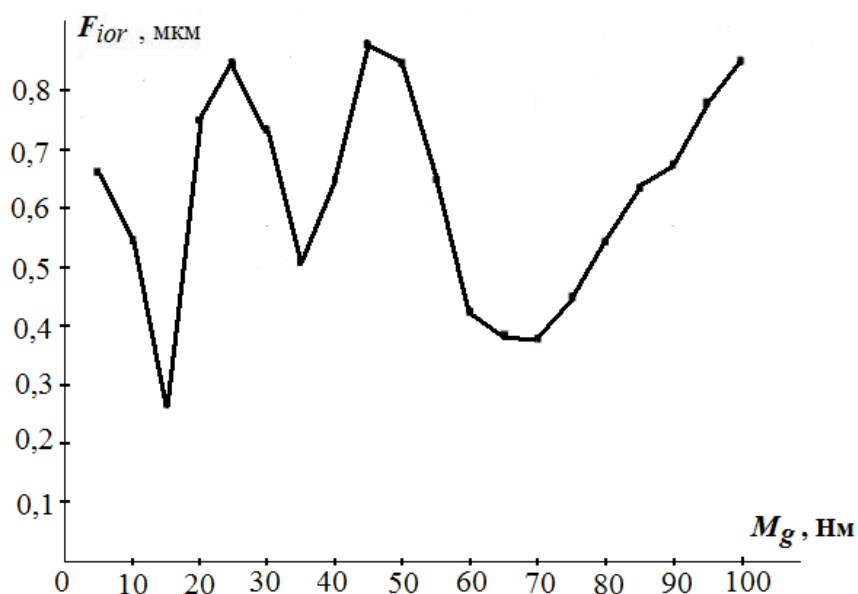


Рис. 6. Кинематическая погрешность ВЗП-80 ($x_g = 3.154$, 8 ст. точности гибкого колеса)

Выводы

1. Наибольшая погрешность волновой зубчатой передачи F_{ior} значительно меньше накопленной погрешности шага гибкого колеса F_{pr} . Это объясняется наличием двух зон зацепления. Погрешности расположения зубьев в первой зоне зацепления вызывают поворот гибкого колеса в одну сторону, а во второй зоне зацепления – в другую.

2. При малых нагрузках наличие бокового зазора может значительно увеличить кинематическую погрешность передачи. С этой точки зрения волновую передачу желательно собирать с предварительным натягом.

3. Для ВЗП-80 с 8 степенью точности изготовления ГК кинематическая погрешность F_{ior} изменяется от 0,27 до 0,88 мкм (от 1,5 до 4,8 угл. сек.), что соизмеримо с собственной кинематической погрешностью передачи.

4. В общем случае накопленную погрешность шага ГК можно разложить в ряд Фурье

$$F_{pr} = \sum A_{F_{pri}} \cdot \sin(\varphi \cdot i),$$

где $A_{F_{pri}}$ – амплитуда i -ой гармоники.

В статье рассмотрено влияние на кинематическую погрешность передачи только первой гармоники. Следует отметить, что четные составляющие F_{pr} будут оказывать большее влияние на кинематическую погрешность передачи, чем нечетные составляющие. Для четных составляющих отклонения угловых координат зубьев от номинальных значений в двух зонах зацепления одинаковые по величине и направлению.

Список литературы

1. Люминарский И.Е., Люминарский С.Е. Расчет кинематической погрешности волновой зубчатой передачи как упругой системы с односторонним контактом звеньев // Известия вузов. Машиностроение. – 2008. – № 8. – С. 9–19.

2. Люминарский И.Е. Собственная кинематическая погрешность волновой зубчатой передачи // Машиностроение и инженерное образование. – 2008. – № 2. – С. 53–56.

Influence of an error in running-in of flexible gear on the kinematic error VZP-80

77-30569/306686

01, January 2012

Lyuminarskii S.E.

Bauman Moscow State Technical University

katjstas@mail.ru

The article depicts the origin of harmonic drive kinematic error. Basing on computer calculation, the author studied influence of the accumulated error of the flexible gear pitch on the drive kinematic error dependence. It is shown that at low loads side clearance may significantly increase kinematic error of the drive.

Publications with keywords: [волновая передача](#), [flexible gear wheel](#), [rigid wheel](#), [kinematic error](#), [pitch accumulation error](#), [generating process error](#)

Publications with words: [волновая передача](#), [flexible gear wheel](#), [rigid wheel](#), [kinematic error](#), [pitch accumulation error](#), [generating process error](#)

Reference

1. Liuminarskii I.E., Liuminarskii S.E., Calculation of the kinematic error of the wave gear drive as the elastic system with unilateral contact links, *Izvestia vuzov. Ser. Mashinostroenie* 8 (2008) 9–19.
2. Liuminarskii I.E., Its own the kinematic error of the wave gear transmission, *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie* 2 (2008) 53–56.