

Результаты исследования. В ходе исследования были получены формулы для расчета величины дисбаланса (25) и угла (26). Для устранения неоднозначности угол дисбаланса необходимо рассчитывать, пользуясь алгоритмом, приведенным на рисунке 2.

Выводы. В результате анализа традиционных способов и средств измерения статической неуравновешенности роторов стала очевидной необходимость дальнейших исследований в этом направлении. Для этого автором данной статьи ранее были разработаны и защищены патентами (в соавторстве) способ и устройства для определения статической неуравновешенности роторов. Для практической реализации предложенных решений понадобилось математическое обоснование, которое отражено в данной статье в виде вывода необходимых математических формул.

Научная новизна заключается в определении величины статической неуравновешенности роторов расчетным путем по измеренным частотам свободных колебаний маятниковой рамы с установленным на нее ротором.

Практическая значимость данной работы заключается в возможности создания относительно точного, а также простого в изготовлении и обслуживании устройства для определения статической неуравновешенности роторов.

Список литературы: 1. ГОСТ22061-76. Машины и технологическое оборудование. Система классов точности балансировки. 2. *Артоболевский И.И.* Теория механизмов и машин. – М.: Наука, 1988. – 639с. 3. Теория и конструкция балансировочных машин / Под ред. *проф. В.А. Щенетильникова*. – М.: Машгиз, 1963. – 443с. 4. *Мамонтов А.В.* Методы вибродиагностики неуравновешенных роторов для снижения вибрации и шума производственного оборудования // Радиоэлектроника и информатика: Научно-технический журнал. – 2002. – Вып.3. – С.68-70. 5. А.С. №1825996 G01M1/10. 6. Патент Украины №38863 G01M1/00. 7. Патент Украины №39118 G01M1/00. 8. Патент Украины №70504 G01M1/10. 9. *Яблонский А.А.* Курс теоретической механики. Часть II. Динамика. – М.: Высшая школа, 1984. – 423с. 10. *Пановко Я.Г.* Введение в теорию механических колебаний. – М.: Наука, 1991. – 255с.

Поступила (received) 05.02.2014

УДК 621.83

М.В. МАРГУЛИС, д.т.н., профессор каф. ТМ ГВУЗ ПГТУ, Мариуполь;
Я.О. ГОРДИЕНКО, аспирант каф. ТМ ГВУЗ ПГТУ

КОРРИГИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДОРОЖЕК КАЧЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРЕЦЕССИОННЫХ ПЕРЕДАЧ С ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ

В данной статье на основе анализа известных конструкций волновых прецессионных передач с телами качения, а также экспериментальных данных, полученных при испытании прототипа механизма, представлены рекомендации по корригированию профиля поперечного сечения периодических дорожек качения с целью повышения несущей способности и долговечности. Приведены предположенные зависимости, учитывающие влияние точности профиля периодических дорожек качения на расположение точки первоначального контакта тела и дорожки качения.

Ключевые слова: волновая передача, периодическая дорожка качения, тело качения, контактная площадка, угол контакта, корригирование.

Ведение. Актуальность задачи. Прочностной расчет волновых прецессионных передач с телами качения (ВППТК) основывается на определении допустимых контактных напряжений и деформаций, возникающих в процессе работы передачи при контакте тел качения (шариков) с периодическими дорожками качения (ПДК), выполненными на специфических звеньях меха-

© М.В. Маргулис, Я.О. Гордиенко, 2014

низма. Величина контактных напряжений и деформаций напрямую зависит от расположения точки первоначального контакта шарика с ПДК и кривизны контактирующих поверхностей в поперечном и продольном сечениях. В свою очередь расположение точки первоначального контакта шарика и ПДК определяется профилем поперечного сечения ПДК и точностью изготовления контактирующих поверхностей. В связи с этим, актуальна разработка рекомендаций по корригированию профиля поперечного сечения и точности изготовления ПДК, практически определяющих несущую способность и долговечность передачи.

Анализ литературы. В опубликованных ранее источниках [1-3] отсутствуют рекомендации по корригированию формы и точности изготовления ПДК, что и явилось причиной написания данной статьи.

Постановка задачи. Целью данной работы является разработка рекомендаций по корригированию профиля поперечного сечения ПДК с целью повышения несущей способности и долговечности ВППТК.

Материалы исследований. На рисунке 1 представлена схема зацепления двухступенчатой ВППТК и её основные специфические звенья, на рисунке 2 представлена схема зацепления и основные специфические звенья одноступенчатой симметричной ВППТК с закрытым профилем ПДК. Схема зацепления одноступенчатой несимметричной ВППТК соответствует схеме на рисунке 1, кроме того, что в зацеплении присутствует только одно промежуточное колесо, и, соответственно, на прецессионном колесе выполнена одна ПДК. Принципы работы одноступенчатой несимметричной и двухступенчатой ВППТК приведен в [4], принцип работы одноступенчатой симметричной ВППТК с закрытым профилем ПДК описан в [5].

Рассмотрим геометрию зацепления, профиль и траекторию движения производящего инструмента. Для удобства оперирования определениями и понятиями примем следующие обозначения:

- D_{pod} – *произведенный наружный диаметр (produced outside diameter)* – диаметр сферической поверхности, на которой расположена траектория ПДК, выполненной на прецессионном колесе (колесе с наружной сферической поверхностью), траектория ПДК является траекторией производящей фрезы при нарезании данной ПДК;
- D_{pid} – *произведенный внутренний диаметр (produced inside diameter)* – диаметр сферической поверхности, на которой расположена траектория ПДК, выполненной на промежуточном колесе (колесе с внутренней сферической поверхностью), траектория ПДК является траекторией производящей фрезы при нарезании данной ПДК;
- D_{os} – *диаметр наружной сферы (outside spherical diameter)* – диаметр наружной сферической поверхности, выполненной на прецессионном колесе;
- D_{is} – *диаметр внутренней сферы (inside spherical diameter)* – диаметр внутренней сферической поверхности, выполненной на промежуточном колесе, либо обойме;
- D_b – *базовый диаметр (basic diameter)* – диаметр сферической поверхности, на которой расположено траектория движения центров тел качения (шариков) передачи;
- D_{pc} – *диаметр производящей фрезы (diameter of producing milling cutter)* – диаметр фрезы, используемой при нарезании ПДК методом копирования (только для сферических фрез);
- R_{pc} – *радиус производящей фрезы (radius of producing milling cutter)*, $R_{pc} = D_{pc}/2$ (только для сферических фрез);
- D_{re} – *диаметр тела качения (diameter of rolling element)*;
- T_s – *толщина сепаратора (thickness of separator)*;
- β – *угол нутации (nutating angle)*;

α_t – угол контакта (*contact angle*) – угол, равный углу между линией действия результирующей нагрузки на тело качения и плоскостью, касательной к базовому диаметру проходящей через центр тела качения;

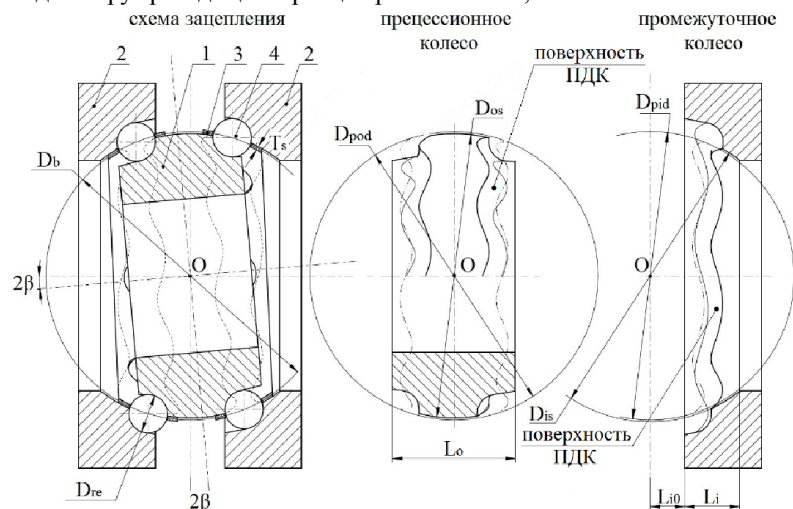


Рисунок 1 – Схема зацепления и основные специфические звенья двухступенчатой ВППТК:

1 – прецессионное колесо, 2 – промежуточное колесо, 3 – сепаратор, 4 – шарик
 схема зацепления прецессионное колесо промежуточное колесо

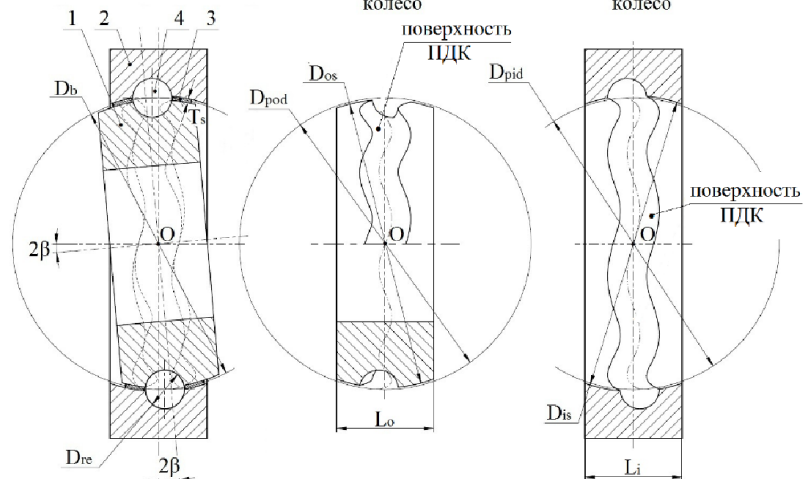


Рисунок 2 – Схема зацепления и основные специфические звенья одноступенчатой ВППТК с закрытым профилем ПДК:

1 – прецессионное колесо, 2 – обойма, 3 – сепаратор, 4 – шарик

Если $D_{pod}=D_{pid}=D_b$, а профиль производящей фрезы имеет форму сферы диаметром D_{pc} , то при работе механизма контакт тел качения с ПДК будет на кромках в точках А и В (рисунок 3). Согласно теории Герца [6] благодаря деформации тел (шарика и ПДК) их первоначальное точечное касание переходит в касание по некоторой площадке.

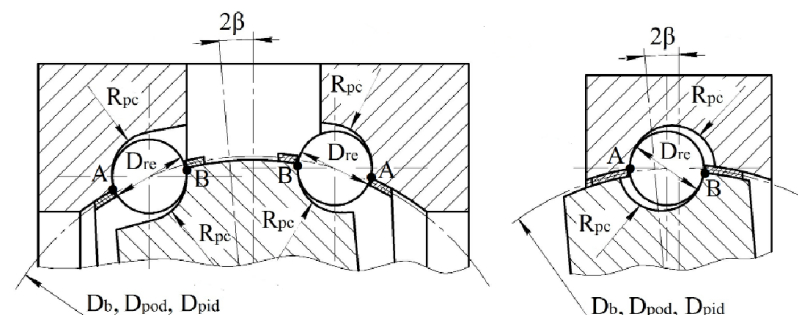


Рисунок 3 – Поперечное сечение ПДК открытого и закрытого типа

При контакте тела качения и ПДК на кромках или в ихблизи, наблюдается резкое увеличение напряжений по сравнению с номинальными напряжениями, т.к. кромка ПДК является концентратором.

При напряжениях, переменных во времени, наличие концентратора напряжений на образцах приводит к снижению предела выносливости. Это объясняется тем, что многократное изменение напряжений в зоне очага концентрации напряжений приводит к образованию и дальнейшему развитию трещины с последующим усталостным разрушением образца, что подтверждено на опытах при испытании передачи.

Расположение углов контакта тела качения и ПДК в размариваемом случае представлено на рисунке 4, величины углов определяются по формулам:

контакт шарика с ПДК на прецессионном колесе

$$\sin \alpha_{tu} = \frac{D_b^2 + D_{re}^2 - D_{os}^2}{2 D_b D_{re}}; \quad (1)$$

контакт шарика с ПДК на промежуточном колесе

$$\sin \alpha_{tu} = - \frac{D_b^2 + D_{re}^2 - D_{is}^2}{2 D_b D_{re}}. \quad (2)$$

Углы α_{tu} являются первоначальными углами контакта — без корригирования.

Для повышения несущей способности передач, увеличения надежности и долговечности необходимо, чтобы контакт тела качения и колес передачи был не на краях ПДК, а смещен на некоторый угол ближе к середине дуги охвата ПДК тела качения – *угол корригирования контакта* α_{tk} , такие передачи назовем *ВППТК с корригированным углом контакта*.

Угол контакта в таком случае будет определяться по формуле:

$$\alpha_t = \alpha_{tu} + \alpha_{tk}. \quad (3)$$

Требуемый эффект корригирования возможно получить изменением траектории ПДК сопряженных колес. *Корригирование траектории ПДК* сопряженных колес заключается в увеличении произведенного наружного диаметра и

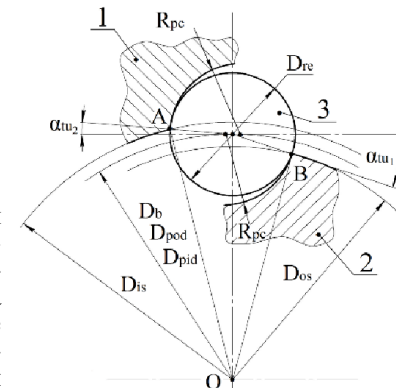


Рисунок 4 – Расположение углов контакта шарика с ПДК, выполненными на основных звеньях ВППТК: 1 – промежуточное колесо; 2 – прецессионное колесо; 3 – шарик

уменьшении произведенного внутреннего диаметра на некоторые величины, x_1 и x_2 соответственно, по отношению к базовому диаметру. На рисунке 5 представлено расположение углов контактов ВППТК с корригированным углом контакта.

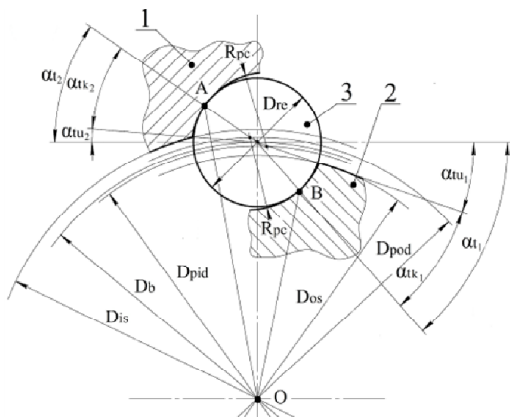


Рисунок 5 – Расположение углов контакта шарика с ПДК, выполненными на основных звеньях ВППТК с корригированным углом контакта:

1 – промежуточное колесо; 2 – прецессионное колесо; 3 – шарик

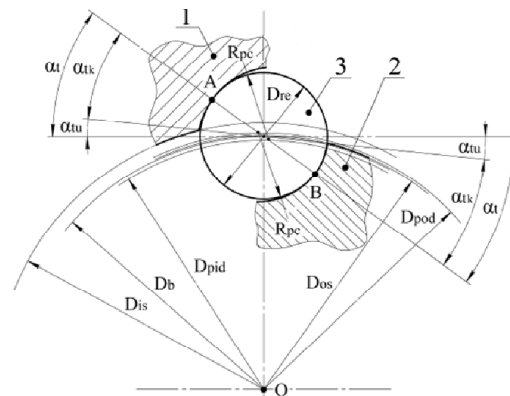


Рисунок 6 – Расположение углов контакта шарика с ПДК, выполненными на основных звеньях ВППТК с корригированным углом контакта и минимизированным первоначальным углом контакта:

1 – промежуточное колесо; 2 – прецессионное колесо; 3 – шарик

$$D_{pod} = \sqrt{D_b^2 + (D_{pc} - D_{re})^2} + 2 D_b (D_{pc} - D_{re}) \sin \alpha_t; \quad (8)$$

$$D_{pid} = \sqrt{D_b^2 + (D_{pc} - D_{re})^2} - 2 D_b (D_{pc} - D_{re}) \sin \alpha_t. \quad (9)$$

При $D_{pc} = 1,02 D_{re}$ согласно [4] уравнения (8) и (9) примут вид:

$$D_{pod} = \sqrt{D_b^2 + 0,0004 D_{re}^2 + 0,04 D_b D_{re} \sin \alpha_t}; \quad (10)$$

Величины углов контакта определяются по формулам:

контакт шарика с ПДК на прецессионном колесе

$$\sin \alpha_t = \frac{D_b^2 - D_{pod}^2 + (D_{pc} - D_{re})^2}{2 D_b (D_{pc} - D_{re})}; \quad (4)$$

контакт шарика с ПДК на промежуточном колесе

$$\sin \alpha_t = \frac{D_b^2 - D_{pid}^2 + (D_{pc} - D_{re})^2}{2 D_b (D_{pc} - D_{re})}. \quad (5)$$

Для обеспечения одинаковых условий контакта шарика с ПДК, выполненными на прецессионном и промежуточном колесах передачи, и повышения коэффициента полезного действия (КПД) необходимо минимизировать и уравнивать первоначальные углы контакта α_{tu1} и α_{tu2} . На рисунке 6 представлено зацепление ВППТК с корригированным профилем ПДК.

Диаметры наружной и внутренней сферы, выполненных на прецессионном и промежуточном колесах, в таком случае будут определяться по формулам:

$$D_{os} = \sqrt{D_b^2 + D_{re}^2} - T_s - T_s; \quad (6)$$

$$D_{is} = D_{os} + 2 T_s. \quad (7)$$

Производящие наружный и внутренний диаметры определяются по формулам:

$$D_{pid} = \sqrt{D_b^2 + 0,0004 D_{re}^2 - 0,04 D_b D_{re} \sin \alpha_t}. \quad (11)$$

Величина угла корригирования контакта должна быть минимально возможной (с целью обеспечения максимального КПД) обеспечивающей гарантированное смещение точки первоначального контакта шарика и ПДК от края ПДК и расположение эллиптической площадки контакта полностью на поверхности ПДК. При этом на расположение точки первоначального контакта значительное влияние оказывает точность изготовления контактирующих поверхностей основных деталей ВППТК, и, следовательно, величина угла корригирования контакта должна учитывать допуски размеров, формы и взаимного расположения формообразующих поверхностей ПДК, тел качения и производящего инструмента, а так же размерный износ инструмента.

Степень точности шариков приведена в [7]. Для ВППТК зависимости от расчетного диаметра тела качения рекомендуется применение шариков согласно таблице.

Таблица – Отклонение среднего диаметра шариков в зависимости от степени точности

Степень точности	Номинальный диаметр шарика, мм	Отклонение среднего диаметра шариков γ , мм
10	От 1 до 25	$\pm 0,009$
20	" 25 " 38	$\pm 0,010$
40	" 38 " 50	$\pm 0,016$
60	" 50 " 80	$\pm 0,030$
100	" 80 " 120	$\pm 0,040$
200	" 120 " 150	$\pm 0,060$

На графике, представленном на рисунке 7, показано влияние точности исполнения произведенного наружного и произведенного внутреннего диаметров на величину угла контакта. Точность исполнения произведенного наружного и произведенного внутреннего диаметров напрямую зависит от точности станка с ЧПУ, на котором производится обработка ПДК, и от точности установки инструмента (точность совмещения центра сферы производящей фрезы с координатной системой станка).

На рисунке 8 показано влияние отклонения диаметра шарика на величину угла контакта, а на рисунке 9 отражено влияние размерного износа производящего инструмента на величину угла контакта.

Действительное расположение угла контакта учитывает все вышеприведенные погрешности. Представленные графики выполнены для передачи с параметрами: базовый диаметр $D_b = 1000$ мм; диаметр шарика $D_{re} = 20$ мм; диаметр производящего инструмента $D_{pc} = 20,4$ мм; проектировочный угол контакта $\alpha_t = 20^\circ$.

Для минимизации влияния размерного износа инструмента на величину угла контакта необходимо разделять чистовую и черновую прорезку ПДК, а финишные проходы выполнять заточенным и калиброванным производящим инструментом.

Рассмотрим влияние точности изготавливаемых деталей на величину колебания номинального угла контакта.

Согласно [8] упростим и запишем формулы определения величины допуска на размер для различных квалитетов, мкм:

размеры до 500 мм

$$T = k(0,45^3 \sqrt{D} + 0,001 D); \quad (12)$$

размеры свыше 500 до 3150 мм

$$T = k(0,004 D + 2,1), \quad (13)$$

где k – количество единиц допуска, равное 10, 16, 25, 40, 64, 160, 400 для 6, 7, 8, 9, 10, 12 и 14 квалитетов соответственно; D – среднее геометрическое значение интервала, в который входит рассматриваемый размер, мм.

На рисунке 10 показано влияние точности исполнения диаметра наружной и диаметра внутренней сфер на величину номинального угла контакта. В

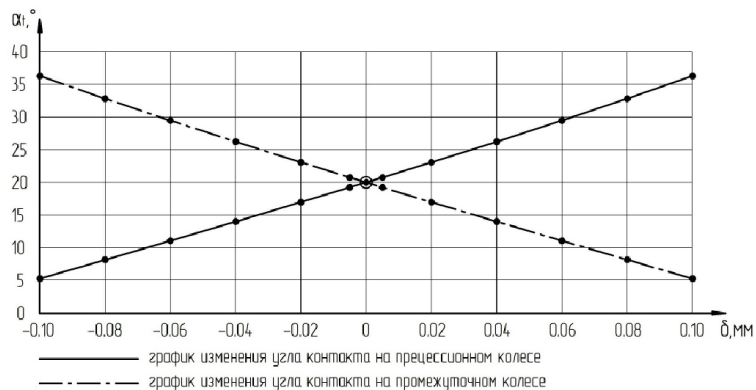


Рисунок 7 – График изменения угла контакта в зависимости от точности исполнения производящего наружного и производящего внутреннего диаметров: α_1 – угол контакта; δ – отклонение производящего наружного и производящего внутреннего диаметра от номинального значения

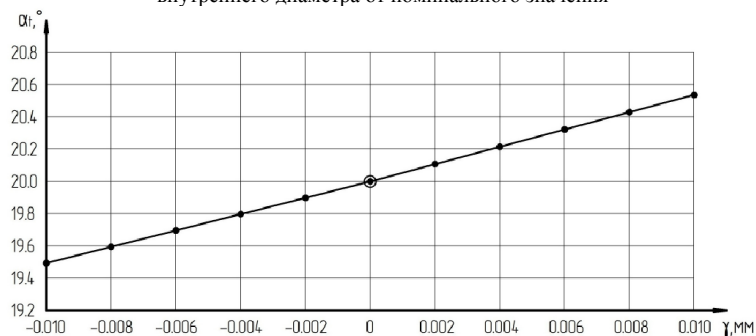


Рисунок 8 – График изменения угла контакта в зависимости от точности исполнения диаметра шарика: α_1 – угол контакта; γ – отклонение диаметра шарика от номинального значения

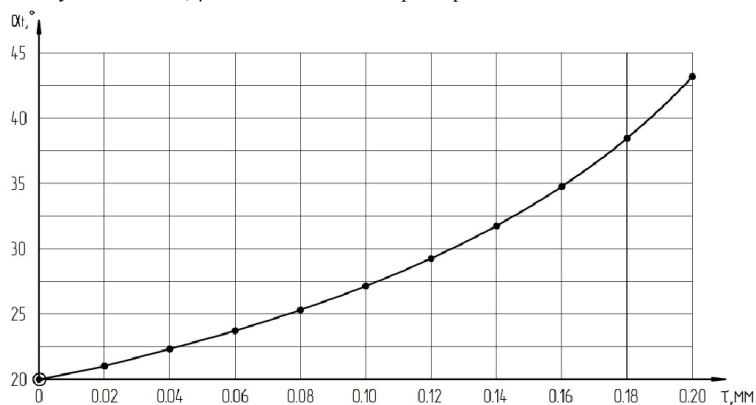


Рисунок 9 – График изменения угла контакта в зависимости от размерного износа производящего инструмента: α_1 – угол контакта; τ – размерный износ производящего инструмента

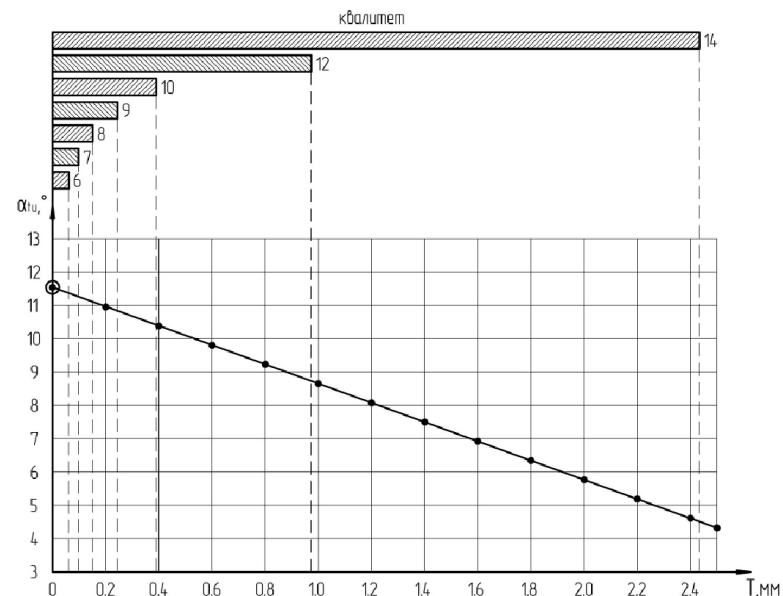


Рисунок 10 – График изменения первоначального угла контакта в зависимости от точности выполнения диаметров наружной и внутренней сфер:

α_{10} – первоначальный угол контакта; T – отклонение диаметров наружной и внутренней сфер рассматриваемом случае, а так же для проектирования новых ВППТК рекомендуется выполнение диаметра наружной сферы в системе вала, а диаметр внутренней сферы в системе отверстия.

Чем выше точность выполнения диаметров наружной и внутренней сфер, тем меньше необходимая величина угла коррекции контакта.

Выводы:

1. Приведены полученные нами аналитические зависимости по корригированию профиля ПДК с целью повышения несущей способности и КПД ВППТК.
2. Рассмотрено влияние точности изготовления ПДК, тел качения и размерного износа производящего инструмента на величину угла контакта шариков и ПДК.

Список литературы: 1. Марзулис М.В. Разработка нового вида волнового зацепления с промежуточными телами качения и технологии его изготовления / М.В. Марзулис, А.Д. Чепурной, А.С. Шайда // Вестник Приазовского гос. техн. ун-та. Серия: Техн. науки. – 2007. – Вып.17. – С.120-124. 2. Марзулис М.В. Силовой передаточный механизм с промежуточными телами качения / М.В. Марзулис, А.С. Шайда // Защита металлургических машин от поломок. – 2006. – Вып.9. – С.97-100. 3. Марзулис М. В. Разработка конструкции рационального силового передаточного механизма с промежуточными телами качения / М.В. Марзулис, А.С. Шайда // Защита металлургических машин от поломок. – 2008. – Вып.10. – С.113-116. 4. Марзулис М. В. Разработка новых волновых прецессионных передач с телами качения / М.В. Марзулис, Я.О. Гордиенко // Вестник Приазовского гос. техн. ун-та. Серия: Техн. науки. – 2013. – Вып.26. – С.161-168. 5. Пат. Украины, МПК⁷ F16H 1/28. Передаточный механизм / Гордиенко Я. О., Марзулис М. В.; заявитель "Приазовский государственный технический университет"; патентообладатель "Приазовский государственный технический университет". – 4с. 6. Ковалев М.П. Расчет высокоточных шарикоподшипников / М.П. Ковалев, М.З. Народецкий. – М.: Машиностроение, 1975. – 279с. 7. ГОСТ 3722-81. Подшипники качения. Шарики. Технические условия. – Введ. 1983-07-01. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1981. – 14с. 8. ГОСТ 25346-89. Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Общие положения, ряды допусков и основных отклонений. – Введ. 1990-01-01. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1989. – 32с.

Поступила (received) 20.03.2014