

## МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МЕТАЛООБРОБКА

УДК 621.83

© Маргулис М.В.<sup>1</sup>, Гордиенко Я.О.<sup>2</sup>

### РАЗРАБОТКА НОВЫХ ВОЛНОВЫХ ПРЕЦЕССИОННЫХ ПЕРЕДАЧ С ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ

*В статье на основе анализа патентов и публикаций по волновым передачам с промежуточными телами качения представлены оригинальные конструкции рассматриваемых передач и их кинематический расчет. Приведенные зависимости для кинематического расчета позволяют учитывать различные соотношения чисел периодов дорожек качения сопрягаемых пар звеньев и их влияние на направление вращения входного и выходного звеньев передач.*

**Ключевые слова:** волновая передача, прецессия, нутация, периодическая дорожка качения, тела качения, передаточное число.

*Маргуліс М.В., Гордиенко Я.О. Розробка хвильових прецесійних передач з тілами кочення. У статті на основі аналізу патентів і публікацій з хвильових передач з проміжними тілами кочення представлені оригінальні конструкції розглянутих передач і їх кінематичний розрахунок. Наведені залежності для кінематичного розрахунку дозволяють враховувати різні співвідношення чисел періодів доріжок кочення сполучених пар ланок і їх вплив на напрямок обертання вхідної і вихідної ланок передач.*

**Ключові слова:** хвильова передача, прецесія, нутація, періодична доріжка кочення, тіла кочення, передавальне число.

*M.V. Margulies, Y.O. Gordienko. The development of harmonic precessional drives with rolling elements. In following article original design and kinematic calculation of harmonic drives with rolling elements are presented, based on patent search and publication analyses. These dependencies for kinematic calculation allow for the different ratios of the numbers of periods race grooves conjugate pair members and their influence on the direction of rotation of the input and output members of transmission.*

**Key words:** harmonic drive, precession, nutation, periodic race groove, rolling elements, reduction ratio.

**Постановка проблемы.** Тенденция интенсивного развития современного машиностроения ставит в ряд первоочередных задач постоянное увеличение мощностей и уменьшение массогабаритных показателей приводов машин и механизмов [1]. В связи с этим актуальна разработка усовершенствованных приводов с использованием прогрессивных волновых передаточных механизмов с телами качения.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В опубликованных ранее источниках [2-6] отсутствуют рекомендации по рациональному конструированию рассматриваемых передач различного назначения, что и явилось причиной написания данной статьи.

**Цель статьи** – разработка рекомендаций по рациональному конструированию волновых прецессионных передач с телами качения и методики кинематического расчета.

**Изложение основного материала.** Рассмотрим конструкции одноступенчатых волновых прецессионных передач с телами качения (ВППТК). На рис. 1 представлены конструкции ВППТК с остановленным промежуточным колесом и различными способами реализации передачи вращающего момента от прецессионного колеса на выходной вал.

<sup>1</sup> д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

<sup>2</sup> аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

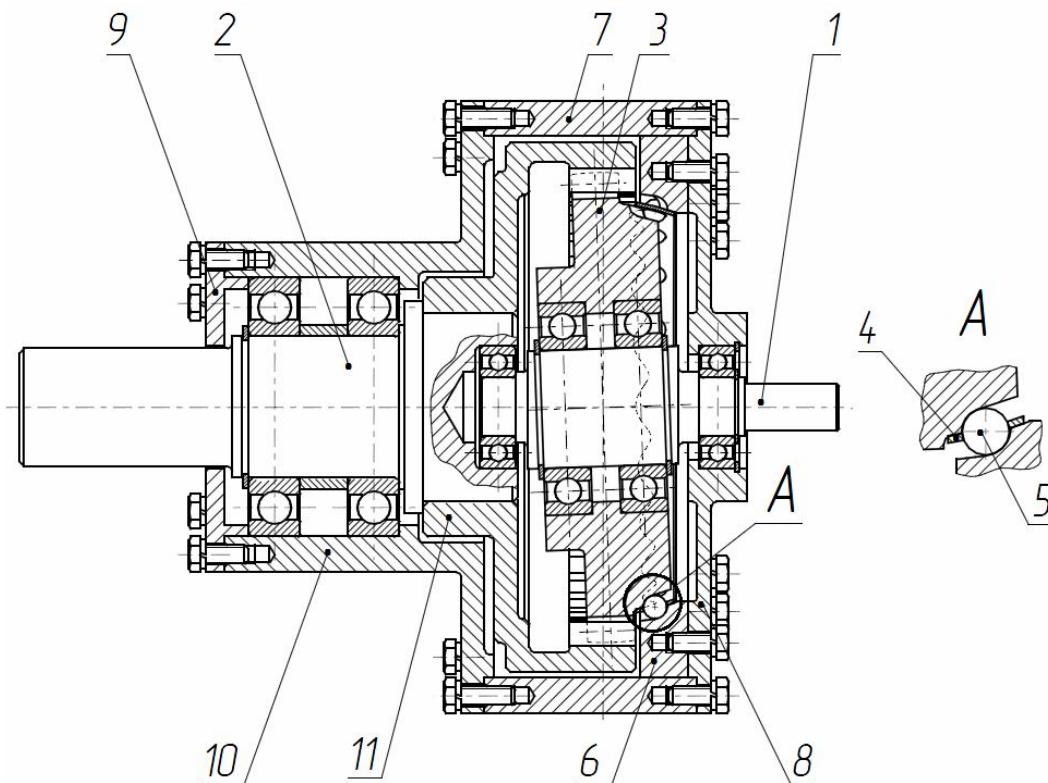


Рис. 1 – Конструкция одноступенчатой ВППТК с остановленным промежуточным колесом: 1 – входной вал, 2 – выходной вал, 3 – прецессионное колесо, 4 – сепаратор, 5 – шарики, 6 – промежуточное колесо, 7 – корпус, 8 – крышка, 9 – крышка, 10 – стакан, 11 – соединительное колесо

*Принцип работы одноступенчатой ВППТК с остановленным промежуточным колесом:*  
При вращении входного вала **1** посредством эксцентриковой шейки, выполненной на валу, возбуждается колебательное (нутацонное) движение прецессионного колеса **3**. На обращенных друг к другу сферических поверхностях прецессионного колеса **3** и промежуточного колеса **6** выполнены замкнутые периодические дорожки качения (ПДК), взаимодействующие друг с другом посредством шариков **5**. Шарик находится в постоянном контакте как с ПДК, выполненной на прецессионном колесе, так и с ПДК, выполненной на промежуточном колесе. Вследствие колебательного движения прецессионного колеса все шарики перемещаются вдоль ПДК. При этом из-за разного числа периодов криволинейных дорожек качения на колесах передачи, прецессионное колесо вращается с редукцией относительно собственной геометрической оси. Для передачи вращающего момента от прецессионного колеса на выходной вал **2** используется соединительное колесо **11**. Соединительное колесо жестко установлено на выходном валу посредством посадки с натягом, шпоночного или шлицевого соединения, обеспечивающего передачу вращающего момента. Передача вращающего момента от прецессионного колеса **3** к соединительному колесу **11** осуществляется посредством зубчатого соединения, наружные и внутренние бочкообразные зубья выполнены на прецессионном и соединительном колесах соответственно (рис. 1). Возможны и другие варианты соединения колес **3** и **11**. В любом варианте соединения должно обеспечивать их совместное вращение, но исключать передачу колебательного (нутацонного) движения прецессионного колеса **3** на соединительное колесо **11**. Для равномерного распределения шариков **5** по дорожке качения, а также предотвращения контакта между соседними шариками используется сепаратор **4**.

Основное конструктивное отличие одноступенчатых ВППТК, представленных на рис. 2, от описанных выше в том, что прецессионное колесо совершает только колебательное (нутацонное) движение, а передачу вращающего движения и момента на выходной вал выполняет промежуточное колесо, которое в данной конструкции совершает вращательное движение.

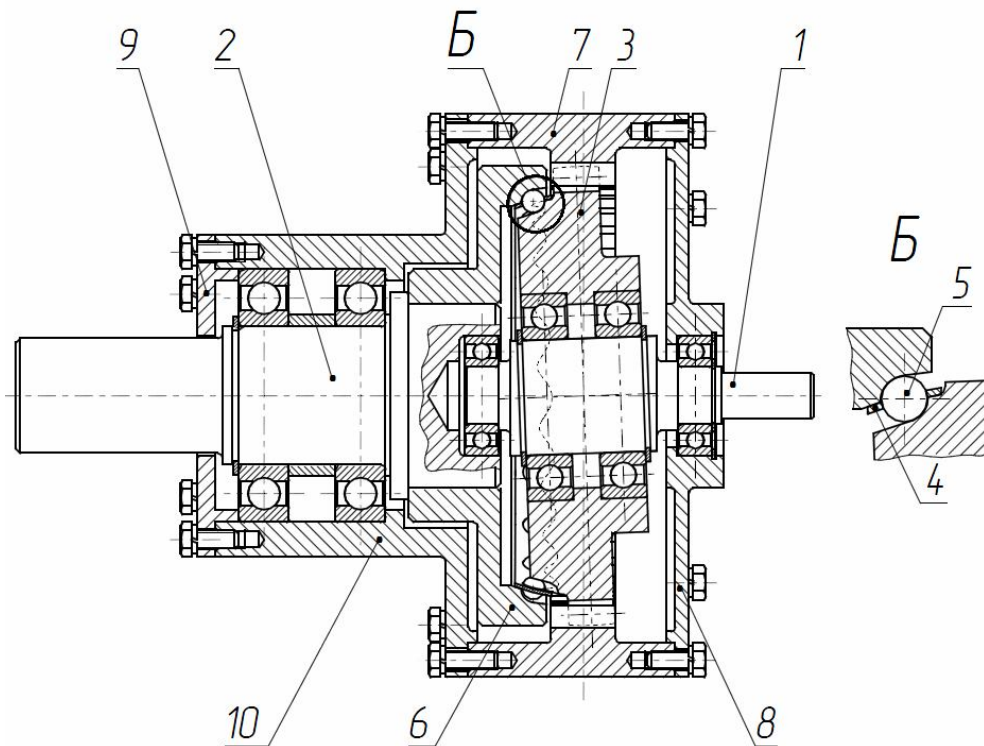


Рис. 2 – Конструкция одноступенчатой ВППТК с невращающимся прецессионным колесом: 1 – входной вал, 2 – выходной вал, 3 – прецессионное колесо, 4 – сепаратор, 5 – шарики, 6 – промежуточное колесо, 7 – корпус, 8 – крышка, 9 – крышка, 10 – стакан

*Принцип работы одноступенчатой ВППТК с остановленным прецессионным колесом:* Метод сообщения в колебательного движения прецессионному колесу 3 аналогичен описанному для ВППТК с остановленным промежуточным колесом (рис. 1). Вследствие колебательного движения прецессионного колеса 3 шарикам 5 сообщается движение вдоль ПДК. Из-за разного числа периодов ПДК на колесах передачи, промежуточное колесо 6 вращается с редукцией относительно собственной геометрической оси. Промежуточное колесо 6 установлено на выходном валу 2, соединение, используемое при установке, обеспечивает передачу вращающего момента. Остановка прецессионного колеса 3 выполняется посредством зубчатого соединения с бочкообразными зубьями. В представленной конструкции наружные и внутренние зубья выполнены на прецессионном колесе 3 и корпусе 7 соответственно. Зубчатые поверхности так же могут быть реализованы на торцевых поверхностях прецессионного колеса 3 и крышки 8. Возможны и другие способы остановки прецессионного колеса, но все они должны исключать его вращение и не препятствовать его нутационному движению.

Угловые скорости трех основных звеньев ВППТК – входного вала 1, колес 3 и 6 связаны зависимостью [7, 8]:

$$\frac{\omega_3 - \omega_1}{\omega_6 - \omega_1} = \frac{z_1}{z_p} \quad (1)$$

где  $\omega_1$  – угловая скорость входного вала,  $c^{-1}$ ;  
 $\omega_3$  – угловая скорость прецессионного колеса,  $c^{-1}$ ;  
 $\omega_6$  – угловая скорость промежуточного колеса,  $c^{-1}$ ;  
 $z_p$  – число периодов ПДК прецессионного колеса;  
 $z_1$  – число периодов ПДК промежуточного колеса.

Из формулы (1) следует, что передаточное число при ведущем прецессионном колесе 3 и остановленном колесе 6 ( $\omega_6 = 0$ ) определяется как:

$$\psi = \frac{z_p}{z_p - z_1} \quad (2)$$

Передаточное число при ведущем колесе  $6$  и невращающемся прецессионном колесе  $3$  ( $\omega_3 = 0$ ):

$$u = \frac{z_1}{z_1 - z_p} \quad (3)$$

Если передаточное число положительное, то направление векторов вращений входного и выходного валов совпадают, и, следовательно, валы вращаются в одну сторону. При отрицательном передаточном числе валы вращаются в противоположные стороны, что следует из формулы (1).

Учитывая изложенное, ВППТК можно разделить на две группы:

- с передаточным числом  $u < 0$ ;
- с передаточным числом  $u > 0$ .

Соотношения чисел периодов ПДК на колесах передачи, определяющие направление вектора скорости вращения выходного вала относительно входного вала одноступенчатой ВППТК (следует из формул (2) и (3)), следующие:

*при остановленном промежуточном колесе*

- $z_p > z_1$  — векторы скоростей входного и выходного валов совпадают;
- $z_p < z_1$  — векторы скоростей входного и выходного валов противоположны;

*при невращающемся прецессионном колесе*

- $z_p > z_1$  — векторы скоростей противоположны;
- $z_p < z_1$  — векторы скоростей совпадают.

Для расширения диапазона передаточных чисел рационально использование двухступенчатых ВППТК. Прецессионное колесо в таких передачах имеет две симметрично расположенные ПДК, и, соответственно, два промежуточных колеса, одно из которых установлено неподвижно, а второе соединено с выходным валом и выступает как механизм отбора мощности. Такое исполнение механизма позволяет получить уравновешенную относительно оси прецессионного колеса систему шариков. На рис. 3 представлена конструкция двухступенчатой ВППТК.

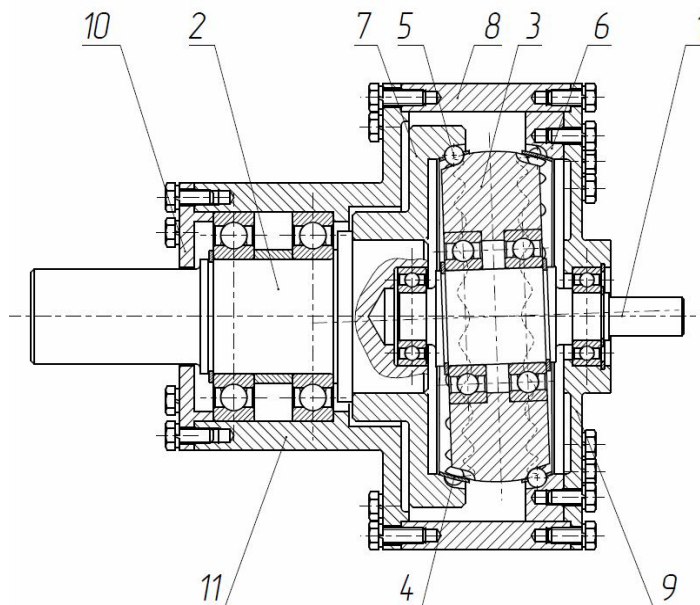


Рис. 3 – Конструкция двухступенчатой ВППТК: 1 – входной вал, 2 – выходной вал, 3 – прецессионное колесо, 4 – сепаратор, 5 – шарики, 6 – промежуточное колесо, 7 – промежуточное колесо, 8 – корпус, 9 – крышка, 10 – крышка, 11 – стакан

*Принцип работы двухступенчатой ВППТК:* При вращении входного вала  $1$  посредством эксцентриковой шейки, выполненной на валу, возбуждается колебательное движение прецессионного колеса  $3$ . На наружной сферической поверхности прецессионного колеса выполнены две симметрично расположенные ПДК, одна из которых взаимодействует посредством шариков  $5$  с ПДК, выполненной на внутренней сферической поверхности остановленного промежу-

точного колеса **6**, а другая с ПДК, выполненной на вращающемся промежуточном колесе **7**. Промежуточное колесо **6**, выполненное неподвижным, может быть соединено с крышкой **9**, либо с корпусом **8**. Промежуточное колесо **7** соединено с выходным валом **2** неподвижно, что обеспечивает передачу вращающего момента. Разность чисел периодов ПДК прецессионного колеса **3** и промежуточного колеса **6** обеспечивает вращение с редукцией прецессионного колеса **3**. Разность чисел периодов ПДК прецессионного колеса **3** и промежуточного колеса **7** обеспечивает вращение с редукцией промежуточного колеса **7**. Скорость вращения выходного вала **2** определяется алгебраической суммой скоростей вращений прецессионного колеса **3** и промежуточного колеса **7** относительно прецессионного.

Для определения суммарного передаточного числа двухступенчатой передачи необходимо определить передаточное число каждой ступени механизма.

Первая ступень включает зацепление прецессионного колеса **3** и промежуточного колеса **6**, вторая ступень механизма включает зацепление прецессионного колеса и промежуточного колеса **7**. Передаточное число первой ступени  $u_1$  определяется аналогично одноступенчатой ВППТК с остановленным промежуточным колесом, второй ступени  $u_2$  – аналогично одноступенчатой ВППТК с невращающимся прецессионным колесом.

$$u_1 = \frac{z_{p1}}{z_{p1} - z_{i1}}, \quad (4)$$

$$u_2 = \frac{z_{i2}}{z_{i2} - z_{p2}}, \quad (5)$$

где  $z_{p1}$  – число периодов ПДК прецессионного колеса находящейся в зацеплении с ПДК промежуточного колеса **6**;

$z_{i1}$  – число периодов ПДК промежуточного колеса **6**;

$z_{p2}$  – число периодов ПДК прецессионного колеса находящейся в зацеплении с ПДК промежуточного колеса **7**;

$z_{i2}$  – число периодов ПДК промежуточного колеса **7**.

Угловая скорость вращения прецессионного колеса,  $c^{-1}$ :

$$\omega_3 = \frac{\omega_1}{u_1}. \quad (6)$$

Для определения угловой скорости вращения промежуточного колеса **7** относительно прецессионного колеса **3**, необходимо определить скорость вращения входного вала **1** по отношению к прецессионному колесу  $\omega_1'$ , которая определяется алгебраической разностью скоростей вращения входного вала и прецессионного колеса.

$$\omega_1' = \omega_1 - \omega_3. \quad (7)$$

Угловая скорость вращения промежуточного колеса **7** относительно прецессионного колеса  $\omega_7'$ ,  $c^{-1}$ :

$$\omega_7' = \frac{\omega_1'}{u_2}. \quad (8)$$

Угловая скорость вращения выходного вала **2**,  $c^{-1}$ :

$$\omega_2 = \omega_3 + \omega_7'. \quad (9)$$

Исходя из формул (5) – (9), *общее передаточное число передачи* определяется по формуле:

$$u = \frac{z_{p1} \cdot z_{i2}}{z_{p1} \cdot z_{i2} - z_{p2} \cdot z_{i1}}. \quad (10)$$

При проектировании экономичных двухступенчатых ВППТК рационально использование двух вариантов исполнения по числу периодов ПДК на звеньях передачи. При первом варианте числа периодов обоих ПДК прецессионного колеса больше чисел периодов ПДК сопряженных соответственно первого и второго промежуточных колес. Условно назовем такой тип передачи – *прямой*. При втором варианте числа периодов обоих ПДК прецессионного колеса меньше чисел периодов ПДК, сопряженных соответственно промежуточных колес, передачу будем называть *обратной*. При таких исполнениях ПДК получаем наибольшее передаточное число при минимально возможных числах периодов, что, в свою очередь, минимизирует трудоемкость изготовления и массоемкость изделия.

Соотношения чисел периодов ПДК на колесах передачи, определяющие направление

вектора скорости вращения выходного вала относительно входного вала двухступенчатой ВППТК, следующие:

$\frac{\omega_{p1}}{\omega_{i1}} > \frac{\omega_{p2}}{\omega_{i2}}$  – векторы скоростей входного и выходного валов совпадают;

$\frac{\omega_{p1}}{\omega_{i1}} < \frac{\omega_{p2}}{\omega_{i2}}$  – векторы скоростей противоположны.

Для обеспечения работоспособности двухступенчатой ВППТК должны выполняться следующие условия:

$\frac{z_{p1}}{z_{i1}} \neq \frac{z_{p2}}{z_{i2}}$ , т.е. число периодов дорожек качения на первой ступени не должно быть

равно или кратно числу периодов на второй. При несоблюдении данного требования векторы скоростей вращения прецессионного колеса 3 и промежуточного колеса 7 относительно прецессионного колеса будут равны по модулю, но противоположны по направлению (знаку). Вращение выходного вала передачи по отношению к входному валу будет происходить в противоположную сторону с частотой равной частоте вращения входного вала, т.е. по отношению к неподвижному наблюдателю выходной вал передачи будет оставаться неподвижным. Как следует из формулы (10) передаточное число передачи будет стремиться к бесконечности, и, следовательно, угловая скорость выходного вала будет стремиться к нулю ( $\omega \rightarrow \infty$ ,  $\omega_2 \rightarrow 0$ ).

$z_{p1} \neq z_{i1}$ ,  $z_{p2} \neq z_{i2}$  является необходимым условием обеспечения редукции в передачах.

Для расширения технических характеристик передаточных механизмов возможно в одном механизме объединение ВППТК и других передач, например зубчатых. Такая потребность может быть связана с необходимостью увеличения дискретности передаточных чисел механизма, либо обусловлена уменьшением трудоемкости механической обработки и сборки. На (рис. 4) представлена конструкция комбинированной передачи, где в механизм с двухступенчатой ВППТК включена дополнительная ступень – планетарная.

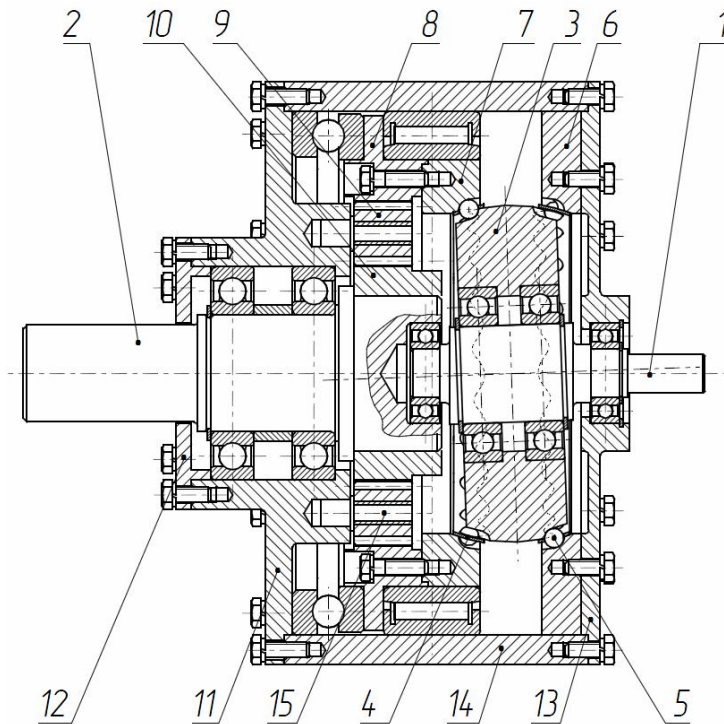


Рис. 4 – Конструкция комбинированной передачи с двухступенчатой ВППТК: 1 – входной вал, 2 – выходной вал, 3 – прецессионное колесо, 4 – сепаратор, 5 – шарики, 6 – промежуточное колесо, 7 – промежуточное колесо, 8 – корона планетарной передачи, 9 – сателлит, 10 – солнечная шестерня, 11 – стакан, 12 – крышка, 13 – крышка, 14 – корпус, 15 – ось

*Принцип работы комбинированной передачи с ВППТК:* Передача работает аналогично двухступенчатой ВППТК за исключением того, что в цепь включается дополнительная ступень – планетарная. Промежуточное колесо 7 неподвижно связано не с выходным валом 2, а с короной планетарной передачи 8. Вращение короны планетарной передачи 8 передается через сателлиты 9 на солнечную шестерню 10, установленную на выходном валу 2. Промежуточное колесо 7 и корона планетарной передачи 8 могут быть выполнены заодно. Передаточное число такой комбинированной передачи определяется как произведение передаточного числа ВППТК и переданного числа планетарной ступени.

#### Выводы

1. Разработаны новые оригинальные конструкции волновых прецессионных передач с телами качения.
2. Приведены рекомендации по кинематическому расчету ВППТК различных конструктивных исполнений.

#### Список использованных источников:

1. Маргулис М.В. Пути совершенствования приводов машин различного назначения [Текст] / М.В. Маргулис // Вестник Приазовского гос. техн. ун-та. Серия: Техн. науки. – 2000. – Вып.10. – стр. 133–138. – Библиогр.: с. 137–138.
2. Пат. 1748907 США, МПК<sup>7</sup> F16H 1/32, F16H 23/04, F16H 25/06. Механизм, передающий движение [Текст] / Бертрам Валленс. – № 349109; заявл. 22.03.1929; опубл. 25.02.1930; приоритет 05.01.1929, № 681928 А (Великобритания). – 4 с. : ил.
3. Пат. 4620456 США, МПК<sup>7</sup> F16H 1/28. Нутационные приводы, имеющие сферические ведущие звенья [Текст] / Роберт Дистен ; заявители Роберт Дистен, Джеймс Е. Шаффер; патентообладатель Современные Энергетические Концепции, Боулдер, Колорадо. – № 434972; заявл. 18.10.1982; опубл. 04.11.1986; приоритет 18.10.1982, № 434972 А (США). – 11 с.: ил.
4. Пат. 5443428 США, МПК<sup>7</sup> F16H 23/00. Беззубчатая механическая передача [Текст] / Эдвард Апрель ; заявители Эдвард Апрель, Мартин Апрель ; патентообладатель Инжиниринговая компания Апреля, Мистик, Коннектикут. – № 235356; заявл. 29.04.1994; опубл. 22.08.1995; приоритет 29.04.1994, № 235356 А (США). – 11 с.: ил.
5. Пат. 2198330 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F16H 25/06. Дифференциальный преобразователь скорости (его варианты) [Текст] / Становской В.В., Шибико А.Ф., Становской А.В., Ремнева Т.А. ; заявитель Становской В.В. ; патентообладатель ООО "Томские трансмиссионные системы"; заявл. 26.04.2001; опубл. 10.02.2003 (RU). – 4 с.: ил.
6. Маргулис М.В. Методика определения основных параметров силовой волновой передачи с промежуточными телами качения [Текст] / М.В. Маргулис, А.С. Шайда // Вестник Приазовского гос. техн. ун-та. Серия: Техн. науки. – 2008. – Вып.18. – С. 130–134. – Библиогр.: с. 134.
7. Волков Д.П. Волновые зубчатые передачи [Текст] / Д.П. Волков, А.Ф. Крайнев, М.В. Маргулис. – К. : Техника, 1976. – 222 с. – Библиогр.: с. 216-219.
8. Кирдяшев Ю.Н. Проектирование сложных зубчатых механизмов [Текст] / Ю.Н. Кирдяшев, А.Н. Иванов. – Л. : Машиностроение, 1973. – 352 с. – Библиогр.: 348-349.

#### Bibliography:

1. M.V. Margulies. Ways of improvement of different machine-drives / M.V. Margulies // Messenger of Pryazovskyi state technical university. Series: Technical sciences. – 2000. – Issue 10. – p. 133–138. – Bibliography: p. 137–138. (Rus.)
2. Patent 1748907 US, international classifications F16H 1/32, F16H 23/04, F16H 25/06. Motion transmitting mechanism / Bertram Valance. – №349109; filed 22.03.1929; publ. 25.02.1930; priority 05.01.1929, № 681928 A (GB). – 4 p.
3. Patent 4620456 US, international classifications F16H 1/28. Nutating drive mechanisms having spherical ball driving elements / Robert Distin, James E. Shaffer. – №434972; filed 3.10.1982; publ. 4.11.1986; priority 18.10.1982, № 434972 A (US). – 11 p.
4. Patent 5443428 US, international classifications F16H 23/00. Gearless mechanical transmission / Edward April, Martin April. – №235356; filed 29.04.1994; publ. 22.08.1995; priority 29.04.1994,

- № 235356 A (US). – 11 p.
5. Patent 2198330 RU, international classifications F16H 25/06. Differential speed converter / V.V. Stanovskoi, A.F. Shibiko, A.V. Stanovskoi, T.A. Remneva. – № 2001111220/28; filed 26.04.2001; publ. 10.02.2003 (RU). – 4 p. (Rus.)
  6. M.V. Margulies. Method of calculation of key parameters of wave gears with intermediate rolling elements / M.V. Margulies, A.S. Shaida // Messenger of Pryazovskyi state technical university. Series: Technical sciences. – 2008. – Issue 18. – p. 130–134. – Bibliography: p. 134. (Rus.)
  7. D.P. Volkov. Wave gears / D.P. Volkov, A.F. Krainev, M.V. Margulies. – К. : Technics, 1976. – 222 p. (Rus.)
  8. U.N. Kirdyashev. Constructional design of complex gear units /U.N. Kirdyashev, A.N. Ivanov. – L. : Engineering, 1973. – 352 p. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самоутугин  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.04.2013

УДК 621.791.052.620.18

© Самоутугин С.С.<sup>1</sup>, Гагарин В.А.<sup>2</sup>

#### ПРИНЦИПЫ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ НАПРАВЛЯЮЩИХ СТАНКОВ

*Предложена усовершенствованная конструкция плазматрона косвенного действия для поверхностного упрочнения направляющих металлорежущих станков. Теоретические заключения подтверждены испытаниями и моделированием с помощью специального расчетного комплекса. Представлен алгоритм расчета и его результаты.*  
**Ключевые слова:** плазматрон, плазменная струя, сопло, межэлектродная вставка,

**Самотугін С.С., Гагарін В.О. Принципи вдосконалення конструкції плазматрона для поверхневої зміцнюючої обробки напрямних верстатів.** Запропонована вдосконалена конструкція плазматрона побічної дії. Теоретичні висновки підтверджені випробуваннями і моделюванням за допомогою спеціального розрахункового комплексу. Представлений алгоритм розрахунку і його результати.  
**Ключові слова:** плазматрон, плазмовий струмінь, сопло, міжелектродна вставка.

**S.S. Samotugin, V.O. Gagarin. The principles of improvement plasmatron design for the surfaces of strengthening treatment of machine-tools guides.** The improved construction of plasmatron of indirect action is offered. Theoretical conclusions are confirmed by tests and design by means of the special calculation complex. The algorithm of calculation and his results are presented.  
**Keywords:** plasmatron, plasma stream, nozzle, inter-electrode insertion.

**Постановка проблемы.** Повышение износостойкости и долговечности направляющих станочного оборудования является актуальным для всех машиностроительных предприятий. Интенсивность изнашивания направляющих в решающей степени влияет на сохранение точности металлорежущих станков и зависит, в первую очередь, от следующих факторов [1-3]: свойства материала (химического состава, структуры и твердости); конструкции направляющих и защитных устройств; системы смазки и применяемых масел; технологии финишной обработки и качества поверхностных слоев; выбора режима резания при эксплуатации станка; интенсив-

<sup>1</sup> д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>2</sup> ассистент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь



ности использования станка; внешних воздействий.

Неравномерный характер износа, большая длина и сложная конструкция при относительно малом весе затрудняют использование объемной термической обработки (заковки) в печах при ремонте направляющих станков. В связи с этим весьма актуальна разработка методов поверхностного упрочнения. Установлена эффективность использования плазменного поверхностного упрочнения [4]. Вместе с тем, существенной проблемой при использовании плазменного нагрева плазмотронами косвенного действия, является необходимость обеспечения малой дистанции обработки – расстояние от среза сопла до обрабатываемой поверхности должно выдерживаться в пределах  $5 \pm 1$  мм. При значительных габаритах мощных плазмотронов с плоской торцевой поверхностью сопловой части выполнить указанное условие при упрочнении сложной поверхности направляющих практически невозможно. В связи с этим, необходимо использование специального плазмотрона с конусной формой сопловой части, форма и размеры которой не только соответствуют требованиям достижения оптимальной тепловой мощности [5], но и обеспечивают оптимальное истечение газа и минимальный разогрев соседних с обрабатываемым участком.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Из литературных источников известны конструкции плазмотронов прямого и косвенного действия, используемых в технологиях поверхностного упрочнения [4-6]. При этом с увеличением мощности увеличиваются габариты плазмотрона. Плазмотроны малой мощности, предназначенные для микроплазменного упрочнения, имеют приемлемые форму и размеры для упрочнения направляющих металлорежущих станков, но обеспечивают образование упрочненной зоны малой толщины.

В Приазовском государственном техническом университете разработан плазмотрон косвенного действия с секционированной межэлектродной вставкой [5]. Разработанный плазмотрон способен работать при тепловой мощности до 40 кВт и удельной тепловой мощности  $(1-1.5) \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Достижимая глубина упрочненной зоны – до 3-4 мм, ширина до 10-15 мм. Данный плазмотрон может работать со стандартным оборудованием для плазменной сварки и резки (Киев -4, АПР-403, УПС-804 и др.).

**Цель статьи** – оптимизация конструкции плазмотрона косвенного действия с секционированной межэлектродной вставкой с целью достижения возможности его применения для упрочнения направляющих металлорежущих станков.

**Изложение основного материала.** Ранее установлены оптимальные геометрические параметры плазмотрона: диаметр электрода 8-10мм, угол заточки электрода 90°; длина канала плазмотрона включает 120-165мм, диаметр внутреннего канала плазмотрона 15мм [7]. Газ вводится в канал плазмотрона аксиальным способом.

В направлении течения газа диаметр канала плазмотрона сужается, что повышает энтальпию газа. Внутренний канал сопла имеет коническую и цилиндрическую часть с выходным диаметром 6мм, который позволяет получить высокую плотность теплового потока, оптимальную для поверхностного упрочнения с высокой скоростью нагрева и охлаждения. Дальнейшее уменьшение диаметра нецелесообразно ввиду снижения эрозионной стойкости сопла и увеличения потерь теплоты.

На качественные показатели работы плазмотрона влияют, прежде всего, параметры благодаря которым формируется плазменная струя с необходимыми характеристиками. Наружные же размеры получаются конструктивно исходя из параметров охлаждения. В тоже время в имеющихся конструкциях плазмотронов нижняя часть, образованная соплом и гайкой имеет форму близкую к плоской, что затрудняет обработку деталей сложной формы. Такие детали, как направляющие металлорежущих станков подвержены изнашиванию ввиду сложных условий эксплуатации, но от их формы зависит обеспечение точности обработки и, соответственно, точности получаемых деталей. В тоже время зачастую они имеют сложную форму (рис. 1) и не могут быть упрочнены плазмотроном с плоской сопловой частью.

Плазмотрон, нижняя часть которого (сопло и нижний фланец) имеют конусообразную форму наружной поверхности, обладает рядом преимуществ [8]. Такой плазмотрон позволяет производить обработку деталей сложной формы. Оптимальное расстояние от среза сопла до обрабатываемой поверхности составляет 5 мм, поэтому детали плазмотрона подвергаются дополнительному нагреву, как горячим газом, отходящим из зоны обработки, так и от нагретой поверхности детали. Конусная наружная поверхность позволяет частично уменьшить такое те-