

повреждения ( $\omega > 0$ ). Комплексный опасный объем  $W_{P\gamma}$  при износоусталостном повреждении определяется как соответствующая функция частных опасных объемов  $V_{P\gamma}$  и  $S_{P\gamma}$  с учетом взаимодействия повреждающих явлений.

Условие надежности имеет вид

$$P(\sigma, \tau_W) \leq [P], \quad (18)$$

либо

$$Q(\sigma, \tau_W) = 1 - P(\sigma, \tau_W) \geq [Q]. \quad (19)$$

Таковы основные теоретические предпосылки расчета с позиции трибофатиги.

**Выводы.** Таким образом, создана методология проектирования силовых систем с позиции трибофатиги, обеспечивающей оптимальное конструирование несущих элементов аварийно-спасательной инженерной и противопожарной техники.

**Перспективы дальнейших исследований.** По мнению авторов в ближайшее время трибофатигический подход станет ключевым при расчете и проектировании несущих элементов противопожарной техники, поэтому начатое исследование есть актуальным и практически целесообразным.

**Список литературы:** 1. Троценко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении / В.Т. Троценко. – Киев: Наукова думка, 1981. – 343с. 2. Приймаков А.Г., Градыский Ю.А., Приймаков Г.А. Основы конструирования силовых волновых механизмов с позиции трибофатиги: Монография. – Харьков: Оберіг, 2012. – 302с. 3. Приймаков А.Г., Воробьев Ю.С., Приймаков Г.А. Теория и конструирование силовых волновых зубчатых передач: Монография. – Харьков: Оберіг, 2010. – 383с. 4. Приймаков А.Г., Приймаков Г.А., Швырев Н.П. Расчет и проектирование герметичных силовых волновых зубчатых передач: Монография. – Харьков: Оберіг, 2010. – 112с.

*Поступила в редколлегию 09.04.2013*

УДК 621.833.7: 614.84

**Основы проектирования несущих элементов силовых систем в машиностроении / А.Г. Примаков, А.В. Устиненко // Вісник НТУ "ХПИ".** Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХПИ". – 2013. – №41(1014). – С.108-114. – Бібліогр.: 4 назв.

Викладені основні принципи проектування силових систем з позиції трибофатиги, що забезпечує оптимальне конструювання несучих елементів аварійно-рятувальної, інженерної та протипожежної техніки. Оцінено вибір матеріалу, площа контакту, ресурсне проектування та розміри поперечних перетинів несучих елементів що проектуються.

**Ключові слова:** силова система, несучий елемент, ресурсне проектування, надійність, трибофатига.

The basic principles for the design of power systems from the perspective of Tribo-Fatigue, ensuring optimal design of load-bearing elements of rescue, engineering and fire-fighting equipment. Evaluated the choice of material, the contact area, resource planning and cross-sectional designed bearing elements.

**Keywords:** power system, the carrier, resource planning, reliability, tribo-fatigue.

УДК 621.833.7: 614.84

**А.Г. ПРИЙМАКОВ**, к.т.н., проф., доцент каф. ОТО АСР НУГЗУ, Харьков;  
**А.В. УСТИНЕНКО**, к.т.н., доц., старший научный сотрудник  
каф. ТММ и САПР НТУ "ХПИ";  
**В.А. ГУЗЕНКО**, к.т.н., доц., начальник каф. ОТО АСР НУГЗУ

## **ТРЕХВОЛНОВЫЕ СИЛОВЫЕ ЗУБЧАТЫЕ ПЕРЕДАЧИ ДЛЯ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ И АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

Предложены новые конструкции силовых трехволновых зубчатых передач для приводных си-

стем противопожарной и аварийно-спасательной техники. Эти передачи имеют повышенную надежность, нагрузочную способность при минимальных уровнях шума и вибрации, что крайне необходимо при выполнении аварийно-спасательных работ.

**Ключевые слова:** трехволновая передача, генератор волн, металлополимерное гибкое колесо, герметизированное пространство.

**Постановка проблемы.** Силовые волновые зубчатые (и фрикционные) передачи (СВЗП) получили широкое распространение в специальном машиностроении Украины, [1-4], в частности, целесообразно использовать их в качестве приводов в автолестницах пожарных типа АЛ-17,30,31, автоподъемниках типа АПК-32,50, в роторах машин дорожно-котлованных типа МДК-2, в роторах траншейных машин колесных ТМК-2, в механизмах поворота стреловых кранов типа КС-4574 и др.

Во всех случаях замене подлежат зубчатые и червячные передачи с большим передаточным числом, высокой надежностью при ограничении по весу и габаритам. Однако практика требует создания надежных высоконагруженных редукторов, способных к многократным перегрузкам в условиях нестационарного нагружения. Такими редукторами, по мнению авторов, есть силовые трехволновые зубчатые редуктора с металлополимерными гибкими колесами [1-4].

**Анализ последних достижений и публикаций.** Разработкой редукторов данного вида занимаются лишь авторы данной статьи [1-3].

**Постановка задачи и ее решение.** Задача исследования формулируется следующим образом: разработать семейство конструкций силовых трехволновых зубчатых редукторов с металлополимерными гибкими колесами для аварийно-спасательной, инженерной и противопожарной техники Украины.

При конструировании ВЗП с МГК, работающих в силовых цепях, возникают некоторые дополнительные затруднения, среди которых:

- обеспечение низких удельных давлений в зоне контакта деталей генератора волн с внутренней полимерной поверхностью МГК;
- обеспечение теплоотвода, (пластические массы практически нетеплопроводны);
- обеспечение невысоких напряжений изгиба полимерного слоя (примерно в 5...10 раз ниже, чем для конструкционных сталей);
- обеспечение прочности соединения металлической и полимерной оболочек МГК.

Поэтому силовые ВЗП с МГК имеют следующие конструктивные особенности:

- создается максимальная площадь соприкосновения металлических и полимерных вращающихся частей (генератор и МГК);
- применяются адгезионно-диффузионное и механическое крепление обоих слоев МГК одновременно;
- назначается рациональная толщина полимерного слоя;
- предусматривается контроль температуры масляной ванны с помощью комплектующего термометра;
- материалы для МГК и вид смазки должны выбираться в строгом соответствии с существующими рекомендациями.

Ниже рассматриваются несколько конструкций ВЗП с МГК. На рисунке 1 показана кинематическая схема ВЗП и МГК для передачи вращения в герметизированное пространство.

В данной конструкции гибкое колесо выполнено составным из закрепленного

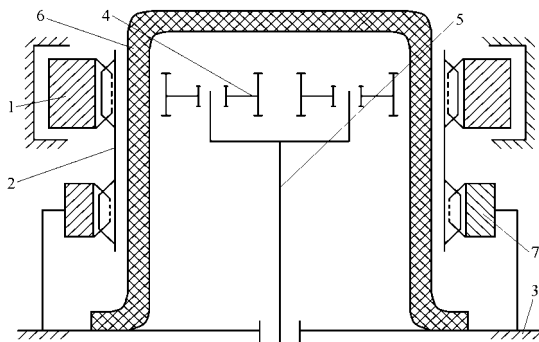


Рисунок 1 – Кинематическая схема герметичной ВЗП с МГК

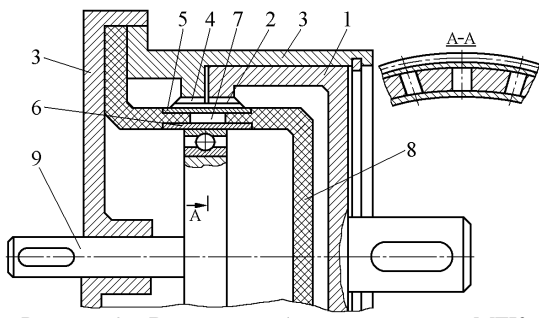


Рисунок 2 – Волновой зубчатый редуктор с МГК

волновой зубчатый редуктор с МГК для передачи движения через герметичную стенку (а.с. №345306 М.КЛ<sup>3</sup> F16H 1/00).

Предлагаемый редуктор позволяет уменьшить осевые габариты редуктора и повысить технологичность изготовления гибкого колеса.

Для этого герметизирующий стакан выполнен из неметаллического материала, например, пластмассы, и снабжен герметично распорными элементами, размещенными равномерно по окружности в сквозных отверстиях герметизирующего стакана между промежуточным кольцом и зубчатым венцом.

Промежуточное кольцо и венец могут быть также герметично установлены в герметизирующем стакане.

Волновой зубчатый редуктор содержит жесткое колесо 1, имеющее внутренний мелкомодульный зубчатый венец 2 с числом зубьев, например, 202. На корпусе 3 редуктора нарезан зубчатый венец 4, имеющий те же диаметры выступов и впадин, что и жесткое колесо 1, и тот же модуль, но меньшее число зубьев, например, 200. Внутри корпуса установлено гибкое герметичное колесо, состоящее из тонкостенного гибкого кольца 5, имеющего наружный зубчатый венец с числом зубьев, равным числу зубьев зубчатого венца 4. Внутри кольца 5 установлено промежуточное кольцо 6. Между кольцами на равном расстоянии по окружности установлены распорные элементы 7, выполненные из твердого материала, например, стали.

Герметизирующий стакан 8 выполнен из неметаллического материала, например, капролона.

Кольца 5 и 6, распорные элементы 7 и стакан 8 соединены в один неразбор-

на корпусе тонкостенного полимерного герметизирующего стакана и надето на него зубчатого венца в виде открытой трубы, соединенной с корпусом посредством зубчатой муфты. Такое выполнение редуктора позволяет повысить несущую способность передачи, а также упростить технологию изготовления гибкого колеса. Такой редуктор содержит жесткое подвижное колесо 1, гибкое колесо 2, соединенное с корпусом 3, генератор 4, закрепленный на входном валу 5. Гибкое колесо 2 в виде открытой трубы насажено на полимерный герметизирующий стакан 6. Такое колесо 2 связано с корпусом 3 посредством зубчатой муфты 7. Соединение гибкого колеса 2 с герметизирующим стаканом 6 осуществляется адгезионно-диффузионным способом.

На рисунке 2 представлен

ный узел – гибкое колесо. Вращающий момент передается на кольцо 6 через вал 9.

Редуктор работает следующим образом. Вращающий момент через вал 9 передается кольцу 6. От него посредством распорных элементов 7 – гибкому зубчатому кольцу 5. В результате того, что зубчатый венец 4 и кольцо 5 имеют одинаковое число зубьев, передаточное число от венца 4 к кольцу 5 будет равно бесконечности, и поэтому кольцо вращаться не будет.

В отличие от этого жесткое колесо 1 в результате разницы в числах зубьев между венцом 2 и кольцом 5 будет вращаться в ту же сторону, что и вал 9.

На рисунке 3 представлена волновая зубчатая передача на МГК, работающая по одноволновой схеме. Характерной особенностью такой передачи является ее повышенная надежность и долговечность ввиду того, что радиальное смещение "гибкого" колеса осуществляется посредством крестовой муфты Ольдгейма.

На входном валу 1 крепится одноволновый дисковый генератор, состоящий из эксцентричной втулки 2, подшипника и наружного диска 3, который через полимерное кольцо 8 контактирует с гибким колесом, имеющим наружный зубчатый венец. "Гибкое" колесо 4 входит в зацепление с жестким колесом 5, смещаясь в радиальном направлении посредством муфты Ольдгейма 6, и далее связано с выходным валом.

Вся передача размещена в корпусе 9 и закрывается крышками 10 и 11. Крепление полимерного кольца осуществляется адгезионно-диффузионным способом. Современные приемы зубонарезания позволяют обеспечить требуемую геометрию зацепления такой ВЗП.

Для упрощения технологии покрытия металла полимерным слоем можно покрывать полимером не внутреннюю поверхность гибкого колеса, а наружную поверхность дисков дискового генератора либо гибкого подшипника кулачкового генератора. На рисунке 4 показан трехдисковый генератор волн.

На выходной конец вала 1 на шпонке 2 посажены три эксцентрич-

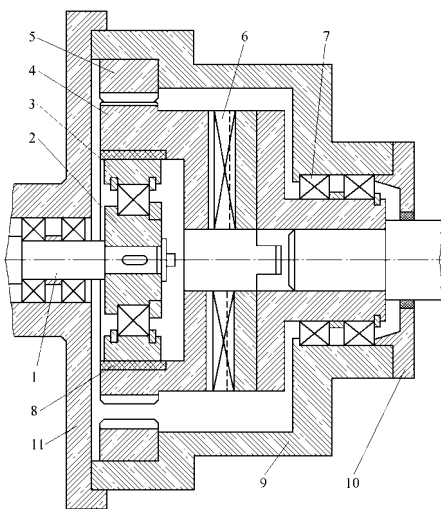


Рисунок 3 – Одноволновая передача на базе крестовой муфты Ольдгейма

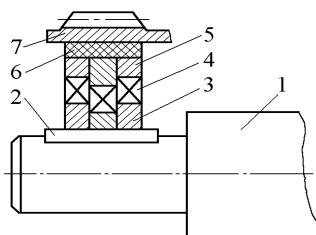


Рисунок 4 – Трехдисковый металлполимерный генератор волн

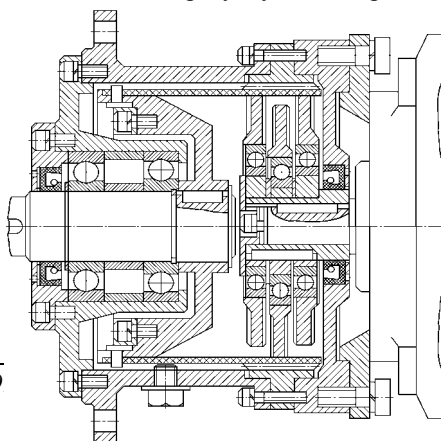


Рисунок 5 – Трехволновой силовой мотор-редуктор

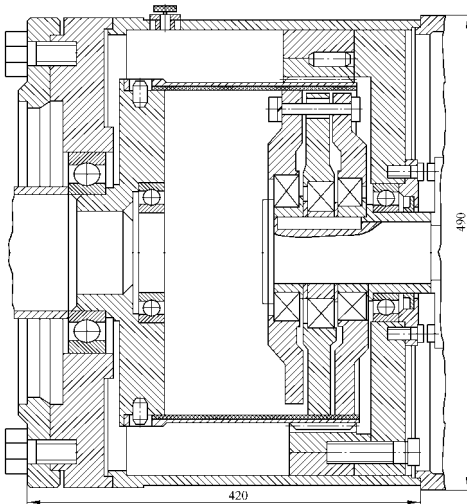


Рисунок 6 – Высокомомментная ТВЗП с МГК

ные втулки 3, смещенные относительно друг друга на  $120^\circ$ . На втулки 3 одеты три подшипника 4, а затем три диска 5, наружная поверхность которых покрыта полимерным слоем 6, который и контактирует с внутренней металлической поверхностью гибкого колеса 7. При такой конструкции сохраняются все прежние расчетные зависимости.

Фиксация втулок (поз. 3), подшипников (поз. 4), а также дисков (поз. 5) осуществляется при помощи крепежных изделий и специальных буртиков.

На рисунке 5 представлен сборочный чертеж трехволнового зубчатого силового мотор-редуктора с дисковым генератором волн. При сравнительно малых осевых и радиальных

габаритах и уровне шума, не превышающем 71дБ, мотор-редуктор имеет следующие характеристики:

- крутящий момент на тихоходном валу – 300Н·м;
- передаточное число – 91;
- направление вращения тихоходного вала – реверсивное;
- частота вращения генератора –  $1465 \text{ мин}^{-1}$ ;
- мощность установленного электродвигателя – 2,5 кВт;
- модуль зубчатого зацепления – 0,5мм.

Полимерный слой МГК выполнен из капролона В. Нароботка на отказ такого мотор-редуктора составляет не менее  $2 \times 10^8$  циклов при периодических трехкратных перегрузках.

На рисунке 6 представлена высококомментная трехволновая зубчатая передача с МГК, созданная для ОАО ММК им. Ильича (г. Мариуполь).

При среднем уровне звукового давления, равном 77...79дБ, передача имеет следующие параметры:

- |  |                                  |
|--|----------------------------------|
| - момент на тихоходном валу                          | $T_T=7602\text{Н}\cdot\text{м};$ |
| - передаточное число ( $z_T=201, z_{Ж}=207, k_z=2$ ) | $u=33,58;$                       |
| - частота вращения генератора                        | $n_H=1436\text{мин}^{-1};$       |
| - расчетный срок службы                              | $T_h=7000\text{ч};$              |
| - модуль зубчатого зацепления                        | $m=1,75\text{мм};$               |
| - КПД  | $\eta=0,85.$                     |

Материал полимерного слоя – полиуретан ПУ-1, сопряжение обоих слоев – адгезионно-диффузионное и механическое с помощью штифтов.

Следует отметить, что только трехволновая схема позволяет получить в одной ступени столь низкое значение передаточного числа  $u=33,58$  при значительных нагрузках ( $T_T=7602\text{Н}\cdot\text{м}$ ).

**Волновая зубчатая передача с магнестрикционным генератором волн.** Предлагается новый вид волновой зубчатой передачи, которая работает по

двухволновой схеме зацепления, позволяет значительно повысить надежность, долговечность, нагрузочную способность и значительно расширить нижний предел диапазона передаточных отношений путем замены наиболее нагруженного гибкого зубчатого колеса жестким диском из магнитострикционного материала с внешним зубчатым венцом без изменения геометрии зацепления.

Новая волновая передача имеет улучшенные динамические характеристики и практически безинерционна. Единственным недостатком конструкций, которая предлагается, есть увеличение радиальных размеров передачи для создания достаточной величины магнитной индукции внешней обмотки. В настоящее время в практике нет аналога новой волновой передаче, которая совмещает все известные преимущества волновых передач и не имеет их традиционных недостатков.

Предлагается наиболее уязвимый элемент волновой передачи – гибкое колесо – выполнять в виде диска с внешним зубчатым венцом из магнитострикционного материала, например, сплава  $Fe-Ni$ , с необходимым и стабильным коэффициентом магнитострикции  $K_M$ .

Магнитострикционный диск связан с выходным валом передачи, обеспечивая волновое зубчатое зацепление без гибкого элемента, причем, число волн деформации кратно числу пар полюсов внешней обмотки, что обеспечивает подачу вращающегося электромагнитного поля в зону зубчатого зацепления. Деформируя магнитострикционный диск с внешним вращающимся зубчатым венцом электромагнитным полем, обеспечиваем его волновое зацепление с внутренним зубчатым венцом жесткого колеса, причем все элементы этого зацепления являются жесткими, вследствие чего растет надежность, долговечность, нагрузочная способность такой передачи без ухудшения других критериев работоспособности. Кинематическая схема такой передачи – традиционна [1-4].

Диапазон передаточных отношений такой передачи находится в пределах 30...500, величина внешних нагрузок колеблется в пределах, которые ограничиваются величиной магнитной индукции внешней обмотки; время включения и выключения определяется временем срабатывания электромагнитного поля; в процессе работы под нагрузкой допускаются 3...6-кратные перегрузки.

Минимальная радиальная деформация равна  $W=0,15$  мм, что соответствует минимальному стандартному значению модуля зацепления  $m$  (международный стандарт ISO). Величина необходимой магнитной индукции  $B$  и радиальные габариты внешней обмотки определяются по известным зависимостям с учетом принятой величины  $W$ . Разница количества зубьев равняется или кратная 2, рациональные значения количества зубьев диска и жесткого колеса находятся в пределах 400...440.

Изготовление такой передачи не создает конструкторских или технологических трудностей для потенциального производителя.

**Мелкомодульная волновая зубчатая передача с зацеплением Новикова.** Для обеспечения большей многопарности волнового зубчатого зацепления и повышения нагрузочной способности мелкомодульных гибких колес волновых зубчатых передач целесообразно использовать круговые профили зубьев – зацепление Новикова.

Авторами данной статьи разработана геометрия волнового зубчатого зацепления с круговым профилем зубьев и его прочностной расчет.

Установлены также параметры выходного контура рейки, которые определяют геометрию инструмента для нарезания зубьев.

Установлено, что оптимальное число волн деформаций такой волновой

передачи  $n=2$ , а оптимальный модуль зацепления  $m=0,25...0,5$ мм.

Предложенные авторами конструкции волновых зубчатых передач являются работоспособными по всем критериям работоспособности современных машин и механизмов. Кроме специфических особенностей все предложенные конструкции отличаются своей технологичностью, удобством сборки, надежностью и долговечностью. Если волновая зубчатая передача с магнитострикционным генератором волн дает улучшение динамических характеристик и практически безинерционна, то мелко модульная волновая зубчатая передача с зацеплением Новикова обеспечивает большую многопарность волнового зубчатого зацепления и повышение нагрузочной способности.

Применение современных материалов во всех этих редукторах способствует повышению износостойкости боковых поверхностей зубьев, облегчает термическую обработку контактирующих поверхностей и снижает инерционность подвижных частей волновых передач.

Предложенные конструкции в ближайшее время должны быть внедрены в среднем машиностроении, в частности, в приводных системах аварийно-спасательной, инженерной и противопожарной техники.

Современные методы зубонарезания хорошо согласовываются с технологическими приемами изготовления и сборки основных компонентов предложенных волновых зубчатых передач [4].

**Выводы.** Таким образом, в статье представлено новое семейство конструкций силовых трехволновых зубчатых передач повышенной надежности, нагрузочной способности при минимальном уровне шума и вибрации. Улучшение эксплуатационных характеристик достигается трансформацией гибкого металлополимерного зубчатого колеса, лимитирующего надежность и нагрузочную способность во вращение выходного вала.

**Список литературы:** 1. *Прймаков А.Г., Градыский Ю.А., Прймаков Г.А.* Основы конструирования силовых волновых механизмов с позиции трибофатики: Монография. – Харьков: Оберіг, 2012. – 302с. 2. *Прймаков А.Г., Воробьев Ю.С., Прймаков Г.А.* Теория и конструирование силовых волновых зубчатых передач: Монография. – Харьков: Оберіг, 2010. – 383с. 3. *Прймаков А.Г., Прймаков Г.А., Швырев Н.П.* Расчет и проектирование герметичных силовых волновых зубчатых передач: Монография. – Харьков: Оберіг, 2010. – 112с. 4. *Маргулис М.В.* Снижение материалоемкости машин. – К.: Общ-во "Знание" УССР, 1985. – 32с. (Серия VIII "Новое в науке, технике, производстве", №24).

*Поступила в редколлегию 09.04.2013*

УДК 621.833.7: 614.84

**Трехволновые силовые зубчатые передачи для противопожарной и аварийно-спасательной техники / А.Г. Примаков, А.В. Устиненко, В.А. Гузенко // Вісник НТУ "ХПІ".** Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2013. – №41(1014). – С.114-120. – Бібліогр.: 4 назв.

Запропоновані нові конструкції силових трихвильових зубчастих передач для приводних систем протипожежної та аварійно-рятувальної техніки. Ці передачі мають підвищену надійність, навантажувальну здатність при мінімальних рівнях шуму та вібрації, що в край необхідне при виконанні аварійно-рятувальних робіт.

**Ключові слова:** трихвильова передача, генератор хвиль, металополімерне гнучке колесо, герметизований протріп.

Proposed new construction of power three-wave gears drive systems for fire and rescue vehicles. These transmission have increased reliability, load capacity with minimum noise and vibration that edge necessary when performing rescue operations.

**Keywords:** three-wave transmission, generator waves metal flexible wheel, pressurized space.