Янгулов Владимир Семёнович, канд. техн. наук, заведующий учебно-научным центром при кафедре точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ. E-mail: yangulov@sibmail.com
Область научных интересов: механические передачи с промежуточными телами в зацеплении повышенной точности и долговечности.
Грицута Алексей Николаевич, аспирант кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ, ведущий инженер-конструктор Института оптики атмосферы СО РАН, г. Томск.
E-mail: alexgritsuta@gmail.com
Область научных интересов: прецизионные передачи с промежуточными телами качения.

УДК 621.833

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ПЕРЕДАЧИ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРИВОДАХ НАВЕДЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.С. Янгулов, А.Н. Грицута*

Томский политехнический университет
*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск
E-mail: yangulov@sibmail.com;
alexgritsuta@gmail.com

Проведён обзор и анализ прецизионных механических передач с промежуточными телами качения. Определены основные виды передач, которые могут быть использованы в редукторах приводов систем наведения оптических устройств. Сделан вывод о перспективности использования механических передач с промежуточными телами качения в редукторах приводов наведения в оптических устройствах нового поколения.

Ключевые слова:
Волновая передача, червячная передача, шариковинтовый механизм, волновая винтовая передача, промежуточные тела качения, шарикоподшипниковый винтовой механизм, редуктор.

Key words:
Harmonic drive, worm gear, ball screw drive, wave screw gear, intermediate rolling body, ball-bearing screw mechanism, reducer.

В приборах лазерной локации и астрофотографии используют редукторные приводы наведения на объект, которые должны обладать высокой точностью и динамическими качествами [1]. Современные прецизионные редукторы обладают точностью позиционирования 3'…6' [2], что не в полной мере удовлетворяет современным требованиям.

Все виды классических передач обладают зазором в зацеплении, что приводит к люфту и погрешности наведения. Применяемые устройства для выборки зазора ведут к усложнению конструкции, налагают ограничения на диапазон поворота выходного вала привода и увеличивают массово-габаритные характеристики привода.

Применение в опорно-поворотных устройствах оптических приборов приводов с редукторами, в которых применяются передачи с промежуточными телами качения (ПТК), позволит избежать выше перечисленных недостатков и внесет дополнительные преимущества в конструкцию устройства.

Большой объем работ по исследованию передач с ПТК был проведен в Томском политехническом университете. Эти исследования базируются на результатах работ по созданию прецизионного редуктора с высокой долговечностью, которые проводились в ОАО «НПЦ «Полюс», г. Томск. В процессе исследований был разработан целый ряд новых конструкций передач с упругим натягом в зацеплении, что обеспечивает устранение зазоров и отсутствие люфта на длительный срок эксплуатации. Это подтверждается результатами наземных испытаний, приведённых в таблице, и многолетней практики использования данных передач в составе редукторов привода силового гиростабилизатора системы стабилизации и

ориентации космических аппаратов [3]. Теоретические исследования позволяют на стадии проектирования передач с высокой степенью достоверности обеспечить требования по точности, жёсткости, мёртвому ходу и долговечности [3].

Таблица. Результаты исследований редуктора

Параметры	Расчёт	Эксперимент
Погрешность перемещения выходного вала за один шаг двигателя, угл. сек.	2	1
Мёртвый ход выходного вала, угл. сек	2	1
Момент трогания, Н·м	$1{,}5\cdot10^{-5}$	$1{,}3\cdot10^{-5}$
Податливость, угл. мин/Н·м	0,60	0,53
Момент нагрузки, Н·м	0,6	150
Частота вращения входного вала, об/мин	1000	6000

Одной из проблем для оптических приборов является то, что световой поток к приёмнику соосен с выходным звеном редуктора. В червячных передачах есть возможность выполнения червячного колеса таким образом, чтобы он обеспечивал большую апертуру соосного светового потока к приёмнику.

Основными передачами с ПТК, которые могут быть востребованы в точных редукторах приводов оптических систем, являются волновые передачи, червячные, передачи линейного перемещения, а также комбинации этих передач.

Волновые передачи с промежуточными телами качения (ВППТК) по кинематике являются аналогами волновых передач с гибким колесом [3]. Отличие передач в том, что гибкое колесо заменено составным, состоящим из обоймы с радиальными пазами, с размещёнными в них ПТК. В зависимости от направления перемещений ПТК их можно разделить на радиальные и осевые. В свою очередь они делятся на цилиндрические и торцевые. Схема радиальной цилиндрической передачи представлена на рис. 1.

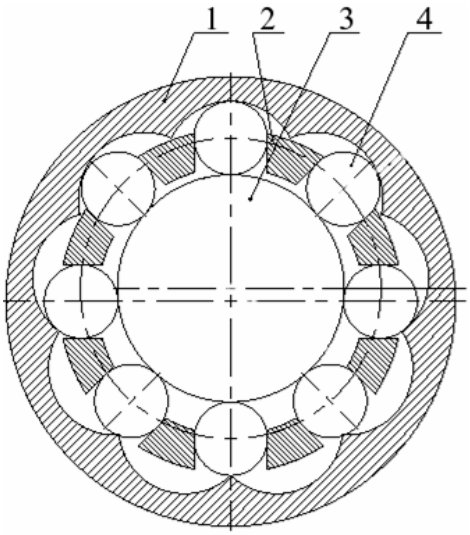


Рис. 1. Волновая радиальная цилиндрическая передача с промежуточными телами качения

Эксцентричный генератор – 3 расположен внутри обоймы – 2, в радиальных пазах которой размещены ПТК – 4, контактирующие с зубьями жёсткого колеса – 1.

Разновидностью данного вида ВППТК является торцевая волновая передача, в которой рабочие поверхности генератора и жёсткого колеса выполнены на торцах дисков, обращённых друг к другу [4]. Такие передачи в СССР исследовались в Могилёвском машиностроительном институте (рис. 2). Примером зарубежных разработок может служить передача [3].

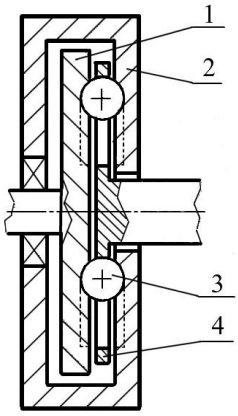
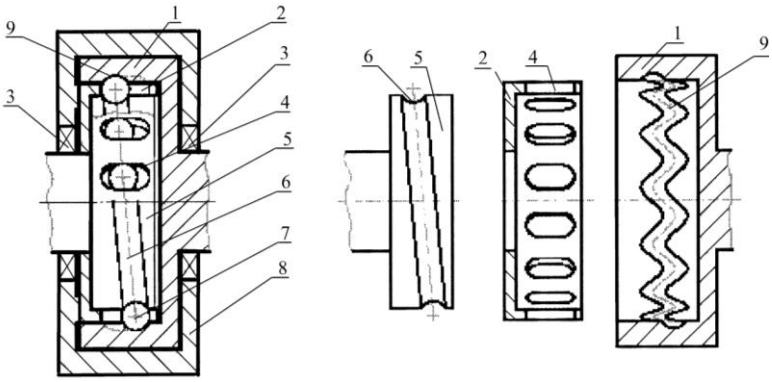


Рис. 2. Волновая торцевая передача с промежуточными телами качения



а *б*

Рис. 3. Осевая передача с телами качения: а) в сборе, б) разобранная

Передача состоит из соосных дисков – 1 и 2, на обращённых друг к другу торцах дисков выполнены профили зубчатого венца и генератора. Между дисками установлен диск – 4 с радиальными прорезями, в которых находятся шарики – 3. Диск – 4 выполняет функцию обоймы.

Пример волновой осевой цилиндрической передачи с ПТК приведен на рис. 3 [3]. Звенья передачи представляют собой соосные цилиндры – 1 и 5. На обращенных друг к другу поверхностях наружного и внутреннего цилиндров выполнены замкнутые периодические дорожки качения – 6 и 9. Промежуточный цилиндр – 2 является сепаратором и имеет продольные прорези – 4, в которых находятся тела качения – 7. Любой из цилиндров может быть входным, выходным или неподвижным звеном. Например, входным звеном – волновым генератором – является внутренний цилиндр – 5, выходным звеном – наружный цилиндр – 1, а неподвижным звеном – сепаратор – 2, соединенный с корпусом – 8. Конструкция передачи должна исключать взаимное смещение цилиндров – 1, 2 и 5 вдоль оси, поэтому в качестве опор – 9 выбираются радиально-упорные подшипники.

При однопериодном волновом генераторе дорожка качения представляет собой косую канавку, многопериодный генератор имеет зигзагообразно изогнутую канавку с числом периодов, отличающихся от числа периодов второго звена.

Червячные передачи с ПТК (рис. 4) как и стандартные червячные передачи состоят из червяка – 1 и червячного колеса – 2, только зацепление осуществляется с помощью ПТК (в данном случае шариков) – 3 расположенных в профильных канавках между колесом и червяком [5]. Шарики, выходя из зацепления, обкатываются по внутренней поверхности

корпуса – 4. Круговая циркуляция ПТК может осуществляться как через канал сделанный с наружи корпуса или в его теле (рис. 5, *а*), так и через тело червяка (рис. 5, *б*).

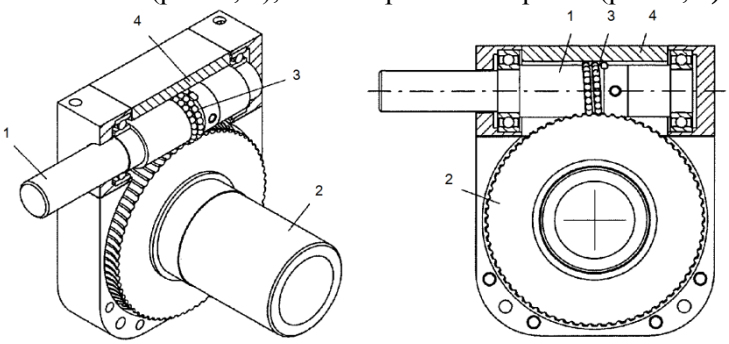
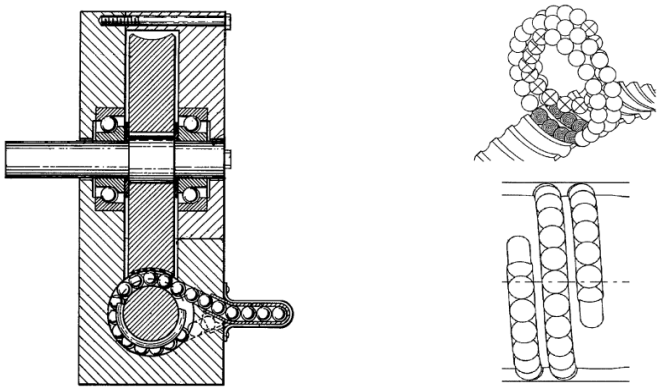


Рис. 4. Червячная передача с промежуточными телами качения.



а *б*

Рис. 5. Варианты исполнения возвратного канала циркуляции шариков: а) в корпусе, б) через червяк

Ещё одной из передач со скрещивающимися валами, является червячная передача с ПТК [6], представленная на рис. 6. Передача содержит червяк – 1 с винтовой нарезкой, в витках которой размещены рабочие шарики – 2 и сепараторные шарики – 3. Рабочие шарики – 2 контактируют с зубьями червячного колеса – 4, а сепаратные шарики – 3 меньшего размера, чем рабочие шарики, выполняют функцию сепаратора. Шарики удерживаются в витках червяка неподвижным корпусом – 5, в котором выполнен канал – 6 для перехода шариков из одного конца зацепления в другой. В корпусе имеется прорезь для обеспечения контакта зубьев колеса с рабочими шариками червяка.

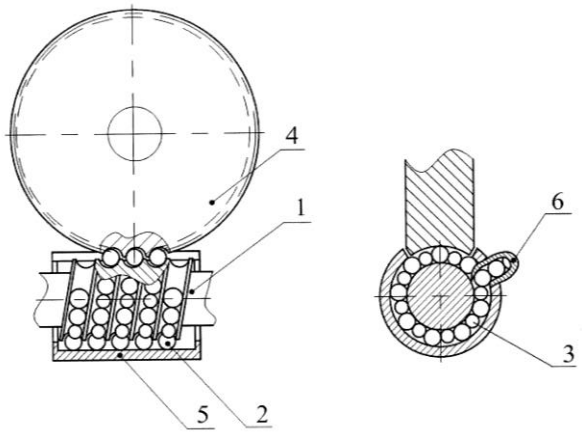


Рис. 6. Червячная передача с промежуточными телами качения

Шариковинтовые механизмы (ШВМ) (рис. 7) – наиболее распространённый тип передач, в которых ПТК – 3 выполняют функцию катков, расположенных между витками винта – 1 и гайки – 2, что существенно снижают потери мощности на трение [7]. Циркуляция шариков, как правило, происходит через внешний возвратный канал – 5. Между шариками могут быть расположены сепараторы – 4, которые исключают трение между шариками, в значительной степени повышают рабочие характеристики.

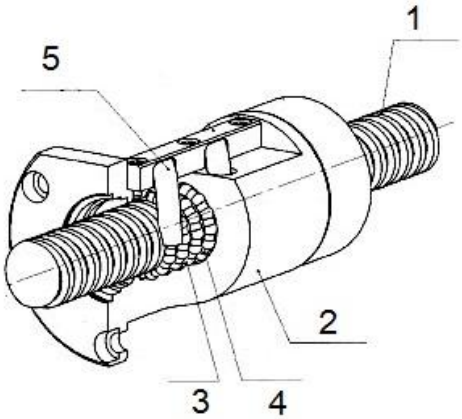
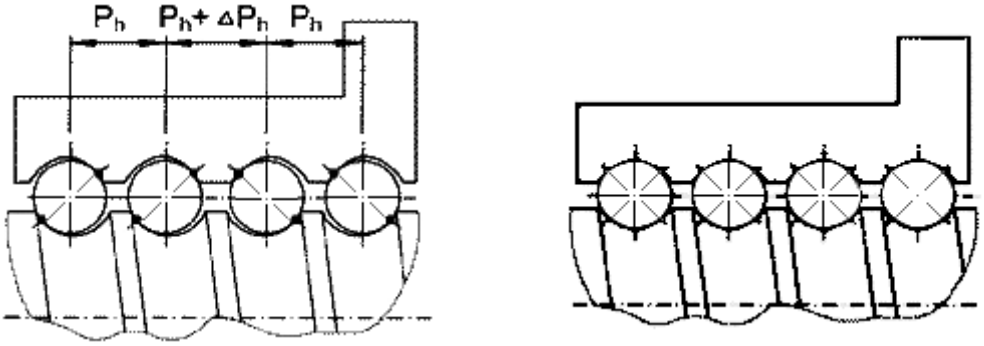


Рис. 7. Шариковинтовой механизм

Предварительный натяг в зацеплении достигается путем осевого смещения витков гайки относительно витков вала (рис 8, *а*) или за счет того, что размер шариков несколько больше, чем размер канавок; это обеспечивает появление четырех точек контакта (рис 8, *б*). Люфт между гайкой и винтом в обоих случаях отсутствует.

Большой вклад в исследования винтовых передач и ШВМ в частности внёс А.И. Турпаев [8]. В последние десятилетия их серийный выпуск начали многие зарубежные фирмы. Этому способствовало интенсивное развитие робототехники.

Среди передач с ПТК следует отметить волновые винтовые передачи. Для пояснения волновой винтовой передачи на рис. 9 показана конструктивная схема передачи и поперечное сечение А–А [9].



а б

Рис. 8. Способы получения предварительного натяга в ШВМ: а) гайка со смещенным шагом витков (контакт по двум точкам; б) шарики с увеличенным диаметром (контакт по четырем точкам).

Волновая винтовая передача работает следующим образом. При вращении генератора – 4 от привода (не показан) шарики – 3 под его воздействием совершают поступательные перемещения в отверстиях обоймы – 2 к поверхности винтовой канавки винта – 1 до контакта с ней, обеспечивая обкатку гибкой гайки по винту. С учётом разницы средних диаметров винтовых поверхностей винта – 1 и гибкой гайки, состоящей из обоймы – 2 и шариков – 3, корпус – 5 будет перемещаться с редуцированной скоростью при неподвижном винте – 1. При неподвижном корпусе – 5 выходным звеном передачи будет винт – 1.

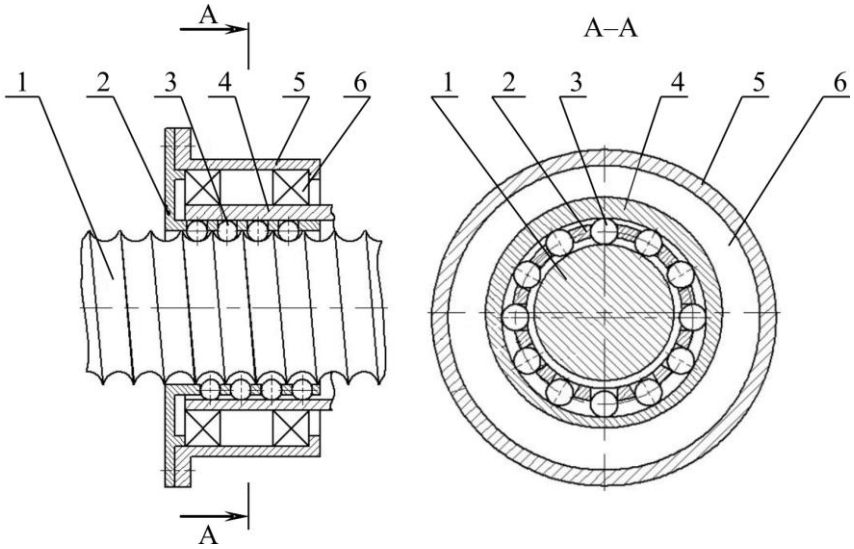


Рис. 9. Волновая винтовая передача

Передаточное число волновой винтовой передачи с многозаходными винтовыми канавками винта и гайки (рис. 10) определяется отношением разности числа заходов винтовых канавок подвижного и неподвижного звеньев передачи к количеству заходов подвижного звена:

$$u = \frac{Z_1}{Z_1 - Z_2},$$

где Z_1 и Z_2 – число заходов винтовых канавок подвижного и неподвижного звеньев передачи, соответственно [10].

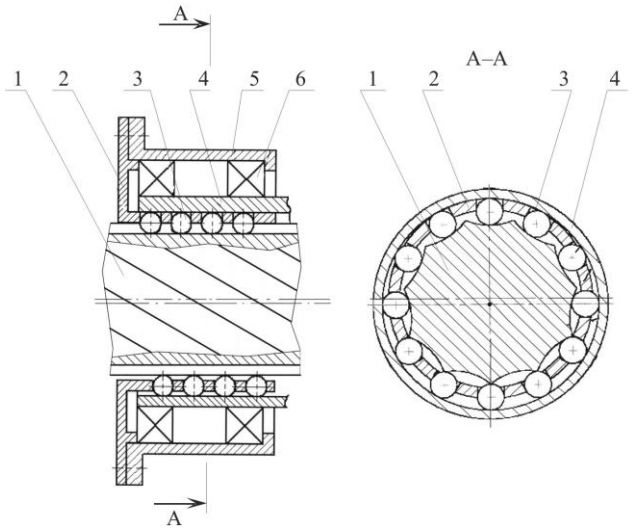


Рис. 10. Волновая винтовая передача с многозаходными винтовыми канавками винта и гайки.

Это приближает волновую винтовую передачу к волновой зубчатой передаче по однозначности значения передаточного отношения и сохраняет преимущества винтовой передачи – повышенное количество шариков, одновременно находящихся в контакте с рабочими поверхностями винтовых канавок винта и гибкой гайки.

Выводы

Проведённый обзор и анализ прецизионных механических передач с промежуточными телами качения, показал перспективность их использования в редукторах приводов систем наведения оптических устройств нового поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Общие сведения о построении ЦСП. 2011. URL: http://w0.sao.ru/hq/sekbta/ Modern/privod/node4.html (дата обращения: 25.10.2011).
2. Сервотехника-Нева. 2011. URL: http://www.servotechnica.spb.ru/gudel/ worm_gears.html (дата обращения: 25.10.2011).
3. Янгулов В.С. Зубчатые передачи повышенной точности и долговечности / под ред. В.С. Дмитриева. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 136 с.
4. Пашкевич М.Ф. Торцовые шариковые редукторы и их кинематика // Вестник машиностроения. – 1985. – № 7. – С.23–26.
5. Обзор патентной литературы. 2011. URL: http://www.freepatentsonline.com/ 7051610.pdf (дата обращения 25.10.2011).
6. Червячная передача: пат. 93913 Рос. Федерация. №2009102441/22; Заявл. 26.01.2009; опубл. 10.05.2010, Бюл. №13. – 2 с.
7. Электропривод. 2011. URL: http://www.electroprivod.ru/bspretightness.htm (дата обращения: 25.10.2011).
8. Турпаев А.И. Винтовые механизмы и передачи. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.
9. Волновая винтовая передача: пат. 69179 Рос. Федерация. №2007121056/22; Заявл. 04.06.07; опубл. 10.12.07, Бюл. № 34. – 5 с.
10. Волновая винтовая передача: пат. 79961 Рос. Федерация. №2008129973/22; Заявл. 21.07.08; опубл. 20.01.09, Бюл. № 2. – 2 с.

Поступила 01.11.2011 г.