

При $\mu=1$, получаем условие устойчивости стационарного вращения ротора без АБУ, приведённое в [4]. Сравнивая (10) с соответствующим неравенством в [4] заключаем, что предельное значение угловой скорости при устойчивом вращении ротора с АБУ $\omega^*(\mu)$ меньше, чем для ротора без АБУ.

В [7] показано, что жидкостное АБУ уменьшает прогиб вала и дисбаланс системы при угловых скоростях вращения

$$\omega > \omega_* = \sqrt{\frac{c}{m_1}} \cdot \sqrt{\frac{2}{1+\mu}}. \quad (11)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусаров А.А. Автобалансирующие устройства прямого действия. – М.: Наука, 2002. – 119 с.
2. Епишев Л.В. О динамической неустойчивости вращающегося ротора при неполном налив жидкости // Научн. докл. высш. школы. Машиностроение и приборостроение. – 1959. – № 2. – С. 66–74.
3. Дерендяев Н.В., Сандалов В.М. Об устойчивости стационарного вращения цилиндра, частично заполненного вязкой несжимаемой жидкостью // Прикладная математика и механика. – 1982. – Т. 46. – Вып. 4. – С. 578–586.
4. Диментберг Ф.М. Изгибные колебания вращающихся валов. – М.: Изд-во АН СССР. – 1959. – 246 с.

Из (10, 11) следует, что устойчивое стационарное вращение ротора с жидкостным АБУ, уменьшающим вибрацию, возможно при угловых скоростях, удовлетворяющих условию $\omega_* < \omega < \omega^*$.

Выводы

Жидкостное автобалансирующее устройство, присоединённое к ротору, уменьшает угловую критическую скорость вала, переход через которую приводит к неустойчивости вращения системы. Устойчивая работа системы реализуется в интервале угловых скоростей, определяемых параметрами ротора и автобалансирующего устройства.

5. Андрейченко К.П. Динамика поплавокных гироскопов и акселерометров. – М.: Машиностроение, 1987. – 128 с.
6. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. – Л.: Машиностроение, 1976. – 320 с.
7. Дубовик В.А., Пашков Е.Н. Стационарное вращение неуравновешенного ротора с жидкостным автобалансирующим устройством при действии сил внешнего трения // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 4. – С. 145–147.
8. Меркин Д.Р. Введение в теорию устойчивости движения. – М.: Наука, 1971. – 312 с.

Поступила 23.11.2006 г.

УДК 621.833

ВОЛНОВЫЕ ПЕРЕДАЧИ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ТЕЛАМИ (состояние, результаты и задачи)

В.С. Янгулов

Томский политехнический университет
E-mail: dtps@lsg.tpu.ru

Приведены результаты практического применения волновых передач с промежуточными телами. Дан анализ причин, которые препятствуют их внедрению в серийное производство. Поставлены первоочередные задачи по устранению этих причин. Определены основные направления по их решению.

Зубчатые передачи находят широкое применение в различных отраслях техники, начиная от маломощных приводов (от долей Вт) до мощных приводов (сотни кВт и более) в различных по назначению механизмах и устройствах. Достоинства и недостатки зубчатых передач описаны и проанализированы во многих работах. Тем не менее, не угасает интерес к поиску и исследованию механических передач, которые могут обеспечить улучшенные параметры приводов.

Одной из сравнительно новых механических передач является волновая зубчатая передача, основанная на принципе волнового деформирования одного из звеньев тонкостенного зубчатого колеса.

Ряд положительных качеств передачи, в первую очередь, это – большое передаточное отношение, привлекли интерес к ней конструкторов во многих отраслях техники, прежде всего авиационной и космической. Первые попытки решить вопросы, связанные с разработкой, изготовлением и эксплуатацией редукторов на базе волновых зубчатых передач, выявили проблемы, которые решались с большими затратами. Циклические знакопеременные нагрузки на тонкостенное зубчатое колесо и на наружное кольцо гибкого подшипника генератора при обычной технологии их изготовления приводили к поломкам этих деталей, т. е. ресурс и надёжность передач были низки.

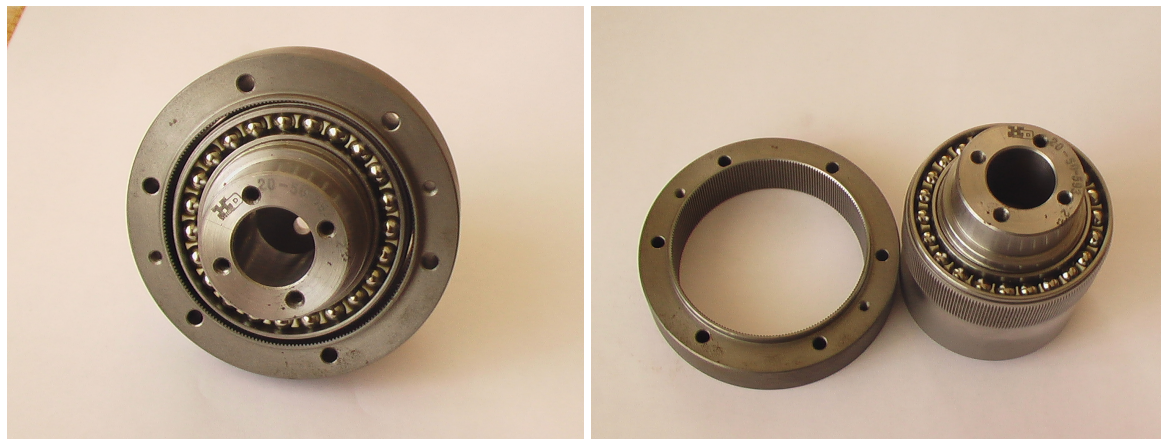


Рис. 1. Волновая передача с гибким колесом (слева в сборе, – справа жесткое колесо снято)

В нашей стране с различной интенсивностью проводились и ведутся работы по разработке работоспособных конструкций волновых зубчатых передач [1–4]. Уровень разработок волновых зубчатых передач и редукторов был доведён до стандартных инженерных расчетов и государственного стандарта [4]. В силу разных причин эти работы не привели к широкому внедрению волновых зубчатых передач.

Бурное развитие робототехники в США, Японии, Южной Корее и других странах потребовало создание целой гаммы исполнительных механизмов, включающих малогабаритные приводы с редукторами. Создание новых технологий в материаловедении, термообработке, обработке металлов и исследования по расчёту и разработке волновых передач позволили практически решить задачу применения волновых передач в редукторах приводов исполнительных механизмов в робототехнике. На рис. 1 представлена волновая зубчатая передача, изготовленная в Японии, используемая в приводах исполнительных механизмов автоматических линий.

Одновременно с исследованиями волновых зубчатых передач в мире постоянно ведется поиск передач, которые обладали бы их положительными качествами, но имеющие более высокие ресурс и надёжность. Одной из них является волновая передача с промежуточными телами. Её отличительной особенностью является замена тонкостенного зубчатого колеса на составное колесо, состоящее из обоймы, в радиальных пазах которой, размещены промежуточные тела, контактирующие с зубьями жесткого колеса под действием генератора. В качестве промежуточных тел использовались разнообразные детали: плунжеры, толкатели, витки змеевидной пружины, тела вращения (шарики и ролики) и др.

Работы, проводимые в ОАО «НПЦ «Полус», г. Томск, начатые с 1975 г., по созданию редукторов для электромеханических исполнительных органов (ЭМИО) систем ориентации космических аппаратов, показали перспективность применения волновых передач с промежуточными телами в приводах, от которых требуется: высокий ресурс, высокая жесткость, минимальный мёртвый ход, малые масса и

габариты. Проведённые исследования и опыт эксплуатации в составе космических объектов показали, что наиболее перспективным является применение в качестве промежуточных тел, тел качения и витков змеевидной пружины. Ряд конструкций волновых передач с этими промежуточными телами были признаны изобретениями [5–10].

Расчёт, конструирование и изготовление волновой передачи с промежуточным телом – змеевидной пружиной не вызвали особых трудностей, для этого были применены и адаптированы известные методы расчётов волновой передачи и технологии изготовления мелко модульных зубчатых передач [11].

На рис. 2 показан редуктор привода ЭМИО, у которого второй ступенью является волновая передача с промежуточными телами – витками змеевидной пружины, расположенными в радиальных пазах обоймы.

В СССР исследования передач с промежуточными телами качения, в том числе и волновых, проводились в Могилёвском машиностроительном институте, Кишинёвском политехническом институте и Томском политехническом институте. Первые результаты реальной работы в нашей стране по изготовлению и внедрению волновой передачи были опубликованы в работах [12, 13]. Дальше изготовления единичного экземпляра, который оказался практически неработоспособным, работа не продвинулась. Причина – недостаток информации по исследованию передач.

Результаты исследований в работе [11] позволили реально рассчитать, сконструировать, изготовить, исследовать и внедрить волновую передачу с промежуточными телами качения (ВППТК) в состав редуктора привода ЭМИО (рис. 3), который применяется до сих пор в ОАО «НПЦ «Полус». Большой вклад в эти исследования внесли А.Е. Белляев и Э.Б. Гиндин – сотрудники Томского политехнического института.

С конца 80-х гг. прошлого века и до сего дня в г. Томске ряд организаций и фирм: НИИ технологии машиностроения; Томские трансмиссионные системы; Сибирская машиностроительная компания и др. ведут работы по разработке приводов на базе ВППТК.



Рис. 2. Волновая передача со змеевидной пружиной (слева в сборе, – справа змеевидная пружина и обойма с пазами)

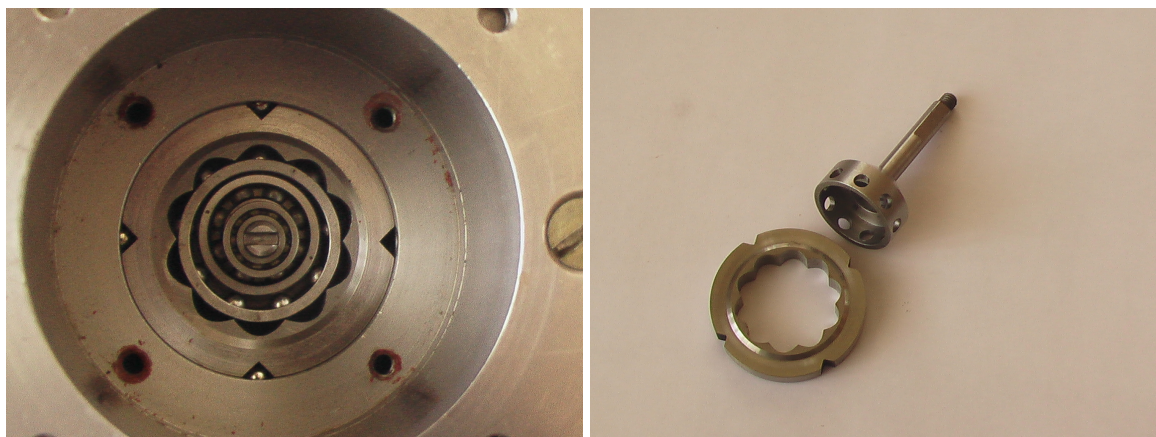


Рис. 3. Волновая передача с промежуточными телами качения (слева в сборе, – справа жесткое колесо и обойма с пазами)



Рис. 4. Мотор-редуктор МР-270



Рис. 5. Привод раскрытия солнечных батарей

На рис. 4–9 представлен ряд разработок Сибирской машиностроительной компании [14], в которых были использованы ВППТК.



Рис. 8. Привод запорной арматуры



Рис. 6. Мотор-редуктор МРТ-2



Рис. 7. Мотор-редуктор привода воздухогревателя



Рис. 9. Лебёдка ЛЭМ-1,5-4

Результаты работ по исследованию ВППТК [11] заинтересовали известные зарубежные компании. Южнокорейская компания «Daewoo» предложила разработать конструкцию редуктора, входящего в состав трансмиссии электромобиля. По разработанной документации был изготовлен редуктор и испытан на модели электромобиля. Японская компания «Komatsu», разрабатывающая и выпускающая строительную и дорожную технику, также проявила интерес к данным передачам, обеспечила и провела их презентацию в Японии. После этого договор был продолжен с целью замены планетарного редуктора для одного из изделий компании на редуктор, состоящий из ВППТК. Документация была выполнена, но до изготовления редуктора дело не дошло из-за высокой себестоимости отдельных операций.

Главными проблемами, из-за которых эти работы не получили развития, стали: отсутствие достоверных и апробированных методик расчёта, прежде всего, жесткости и мёртвого хода передачи и технологий изготовления зубчатого венца жесткого колеса, включая оборудование и инструмент для серийного производства (в перспективе до десятков тысяч редукторов в год разных типоразмеров) с минимальной себестоимостью.

Работы по разработке передач с промежуточными телами качения за рубежом ведутся в основном американскими фирмами «Synkinetics Inc», «Advanced Energy Concepts 81», «Compudrive corporation». Единичные патенты Великобритании, Нидерландов и Японии не позволяют получить достаточной информации о состоянии исследований в этих странах.

Результаты работ по разработке и опыт эксплуатации ВППТК в различных по применению приводах показывают их неоспоримые достоинства по целому ряду параметров по сравнению с другими передачами. Прежде всего, это – высокий ресурс (более 10 лет); минимальный мёртвый ход (2...3 угл. сек.); малые габариты и масса, но при этом до сих пор нет их широкого внедрения. Причин этому несколько: во-первых, нет теоретических исследований, позволяющих расширить области применения данного вида передач, включая САПР для упрощения трудоёмкости расчёта и конструирования передач и редукторов на их базе; во-вторых, трудоёмкая и дорогостоящая технологическая подготовка изготовления основных деталей передачи, прежде всего, жесткого колеса. На сегодня известны только два метода изготовления зубчатого венца жесткого колеса: метод замены профиля зуба на ломанную кривую, составленную из дуг с постоянными радиусами [15] и метод вырезки профилей зубьев электроэрозионными станками [16]. Оба метода трудоёмки и не обеспечивают качества рабочих поверхностей зубьев.

На кафедре точного приборостроения ТПУ, г. Томск, сформирована группа по комплексному исследованию ВППТК для решения проблем по их внедрению в различные по применению приводы. Комплексное исследование подразумевает разра-

ботку редукторов, начиная с расчётов и кончая доступной технологией изготовления основных деталей, прежде всего, зубчатого венца жесткого колеса.

Реально сейчас известны только методики, по которым можно рассчитывать геометрию профиля зубьев жесткого колеса и вести силовой расчёт, что накладывает ограничения на применение этих передач. Необходимо провести теоретические исследования и на их базе разработать инженерные методики расчётов жесткости, мёртвого хода, скоростей относительного скольжения основных звеньев передачи, динамики и др. Конструкции передач с адаптивными генераторами, обеспечивающие беззазорное зацепление, также требуют дополнительных исследований геометрического и силового расчётов. Чтобы соответствовать современному уровню разработки, возникает потребность в системе автоматизированного проектирования, которая бы включала в себя: математическое моделирование, расчетную часть и выход конструкторской документации.

Под доступной технологией, что является большой самостоятельной технической задачей, понимается создание специального оборудования и инструментов, позволяющих с минимальными затратами обеспечивать высокое качество зубчатого венца жесткого колеса. Высокая трудоёмкость (десятки часов) известных методов изготовления зубчатого венца определяется низкой производительностью процесса резания металла на координатных и электроэрозионных станках. Высокие цены на это оборудование и потребность в высококвалифицированном обслуживающем персонале существенно увеличивают себестоимость изготовления деталей. Эти причины сдерживают внедрение ВППТК в серийное производство. Решить проблему можно за счет использования специального оборудования и инструментов, обеспечивающих высокую производительность и низкую себестоимость операции обработки зубчатого венца жесткого колеса. Специальное оборудование должно создаваться на базе серийных универсальных металлорежущих станков, путём их модернизации. Такой подход позволяет снизить трудоёмкость за счёт применения производительных процессов резания металлов (фрезерование и шлифование) и себестоимость операции (относительно низкие затраты на оборудование, инструменты и на обслуживающий персонал средней квалификации).

Заключение

Краткий обзор результатов разработок и эксплуатации редукторов на базе ВППТК в составе приводов различного назначения дает возможность сформулировать следующие основные выводы и поставить задачи для реализации более широкого применения данного вида передач:

- Волновые передачи с промежуточными телами качения являются перспективным видом передач, обладающие положительными качествами волновых зубчатых передач и имеющие ряд до-

стоинств, обеспечивающих высокие значения по ресурсу, мёртвому ходу, жесткости и др.;

- Первоочередными задачами группы по комплексному исследованию ВППТК являются проведение дополнительных теоретических исследований и доведение их до методик инже-

нерных расчётов, включая и САПР, а также разработка и изготовление технологического оборудования и инструмента для изготовления деталей с высоким качеством рабочих поверхностей и обеспечивающих высокую производительность с низкой себестоимостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов М.Н. Волновые зубчатые передачи. – М.: Высшая школа, 1981. – 184 с.
2. Борзилов Б.М. Волновые зубчатые передачи: достижения и результаты // Редукторы и приводы. – 2006. – № 1. – С. 26–28.
3. Тарабарин В.Б. Возрождение интереса к волновым зубчатым передачам – неизбежно // Редукторы и приводы. – 2006. – № 1. – С. 28–29.
4. ГОСТ 26218-94. Редукторы и мотор-редукторы волновые зубчатые. Параметры и размеры. Межгосударственный стандарт. – Введ. с 1996
5. А.с. 638777 СССР. МКИ² F16H 25/00. Передача для преобразования вращательного движения в поступательное / В.С. Янгулов и др. Заявлено 3.01.1977; Опубл. 25.12.1978, Бюл. № 47. – 4 с.: ил.
6. А.с. 154746 СССР. МКИ³ F16H 1/00. Волновая передача / В.С. Янгулов и др. Заявлено 20.12.1978; Зарегистр. 2.02.1981.
7. А.с. 202396 СССР. МКИ³ F16H 1/00. Волновая передача / В.С. Янгулов. Заявлено 13.06.1983; Зарегистр. 27.04.1984.
8. А.с. 212950 СССР. МКИ³ F16H 1/00. Волновая передача / В.С. Янгулов. Заявлено 19.03.1984; Зарегистр. 27.12.1984.

9. А.с. 315418 СССР. МКИ⁵ F16H 1/00. Волновая передача / В.С. Янгулов и др. Заявлено 20.01.1988; Зарегистр. 3.07.1990.
10. А.с. 317718 СССР. МКИ⁵ F16H 1/00. Волновая передача / В.С. Янгулов и др. Заявлено 20.01.1988; Зарегистр. 3.09.1990.
11. Янгулов В.С. Редуктор системы автоматического регулирования повышенной долговечности: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1984. – 24 с.
12. Беляев А.Е., Брюховецкий В.П. Исследование волновых передач с шариковыми промежуточными телами // Доклады на 5-й научно-техн. конф. ТГУ. – Томск, 1974. – С. 41–48.
13. Брюховецкий В.П. Исследование планетарной эксцентриковой передачи с шариками в зацеплении: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1979. – 21 с.
14. <http://smc.tomsk.ru/vppz.html>
15. <http://sodicom.ru/publications/articles/article5>
16. Об одном из способов изготовления и контроля зубчатого венца планетарной передачи с промежуточными телами / Янгулов В.С. – Томск, 1985. – 6 с. – Рус. – Деп. в ВНИИТЭМР, 1985, № 31мш-85 Деп.

Поступила 26.12.2006 г.

УДК 621.833

ПРЕЦИЗИОННЫЙ РЕДУКТОР ПОВЫШЕННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

В.С. Янгулов

Томский политехнический университет
E-mail: dtps@lcg.tpu.ru

Представлены результаты работ по созданию прецизионного редуктора, входящего в состав космических аппаратов. Описано модульное построение конструкции редуктора на базе волновых передач с промежуточными телами качения. Предложена конструкция редуктора с модульным построением кинематической цепи, в которой применены передачи с адаптивными генераторами, обеспечивающие упругий натяг в зацеплении.

Высокие требования к космической технике определяют параметры всех блоков и узлов, входящих в состав космического аппарата. Основным параметром для космического аппарата является высокий ресурс. Одним из блоков, определяющих работоспособность космического аппарата, является система ориентации, в которую входят и электромеханические исполнительные органы. В некоторых из них применяются приводы поворота рамок карданова подвеса (ПВР). Прогрессивным направлением в создании приводов ПВР является электромеханический редукторный привод.

Наличие редуктора в составе привода позволяет получать определённые преимущества, но накладывает высокие требования на его параметры.

Работы по созданию редукторов ПВР начаты с 1975 г. в ОАО «НПЦ «Полус», г. Томск [1]. Первые попытки решить задачу, используя известные конструкции передач, не принесли положительного результата. Самой сложной задачей было устранение зазоров в кинематической цепи редуктора, что было одним из основных требований. Мёртвый ход выходного вала не должен превышать 2 угл. сек. на весь ресурс, который более 10 лет. В результате проведённых исследований, включающих в себя теоретические, от создания новых конструкций, разработки методик расчёта параметров до разработки технологии изготовления и контроля деталей редуктора, и экспериментальные, вплоть до эксплуатации в составе космического аппарата, были соз-