

УДК 621.833

**ПРИВОД МАНИПУЛЯТОРА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЙ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО  
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РЕГИСТРАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ В  
ГЕРМЕТИЗИРОВАННОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

*Цуканов А.С., студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Системы автоматического управления»*

*Родионов В.Г., студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Системы автоматического управления»*

*Научный руководитель: Е.А. Перминова, к.т.н., доцент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
[gorod@bmstu.ru](mailto:gorod@bmstu.ru)*

В объеме курсового проекта по курсу ОКП поставлена задача разработки отдельного привода манипулятора, представляющего собой механизм для передвижения регистрационной (например, фото- и видео) аппаратуры на борту космического аппарата. Согласно техническому заданию, необходимо разработать конструкцию привода с волновым зубчатым редуктором (ВЗР), позволяющим передаче работать в герметизированном пространстве. Выходным звеном привода является зубчатая реечная передача, преобразующая вращательное движение в поступательное. Требования к реечной передаче указаны в условии технического задания (табл.1).

*Таблица 1*

Условия нагрузки механизма линейных перемещений

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| Скорость рейки, $\text{м/мин}$     | 0,5 |
| Ускорение рейки, $\text{м/мин}$    | 10  |
| Ход рейки, $\text{мм}$             | 120 |
| Сила на выходном звене, $\text{Н}$ | 30  |
| Перемещаемая масса, $\text{кг}$    | 1,5 |

Главной задачей при проектировании является получение как можно меньших габаритов и как можно большей надёжности. Выбор этих критериев обоснован областью применения разработанного механизма – космической техникой.

Одним из примеров использования привода является реализация поступательного движения регистрационной аппаратуры, например, фото- и видеоаппаратуры, находящейся на борту космического аппарата. Предполагается, что привод находится на борту в условиях невесомости, что делает ценным использование герметичной волновой передачи. Для перемещения камеры в двух плоскостях к механизму линейных перемещений может быть добавлен механизм угловых перемещений, который будет разворачивать непосредственно сам механизм линейных перемещений, обеспечивая две степени свободы. Таким образом, рассматриваемый привод может послужить элементом системы позиционирования, реализующей полярную систему координат. Аналогичным образом механизм линейных перемещений может быть использован в качестве привода для позиционирования солнечных батарей в наземных условиях, например в солнечных электростанциях. При этом к одной рейке может быть прикреплено большое количество пластин солнечных батарей, обладающих невысокой массой.

Для увеличения долговечности гибких элементов волнового зубчатого редуктора (ВЗР) в состав привода включён планетарный редуктор, устанавливаемый между валом двигателя и ВЗР. Волновой редуктор является тихоходным, из-за чего сразу на вал двигателя его устанавливать нельзя. Приемлемая скорость движения волновой передачи и долговечность её гибких составляющих достигается именно за счёт использования планетарного редуктора. Такие комбинированные механизмы позволяют получить значение передаточного отношения от 200 до 2000.

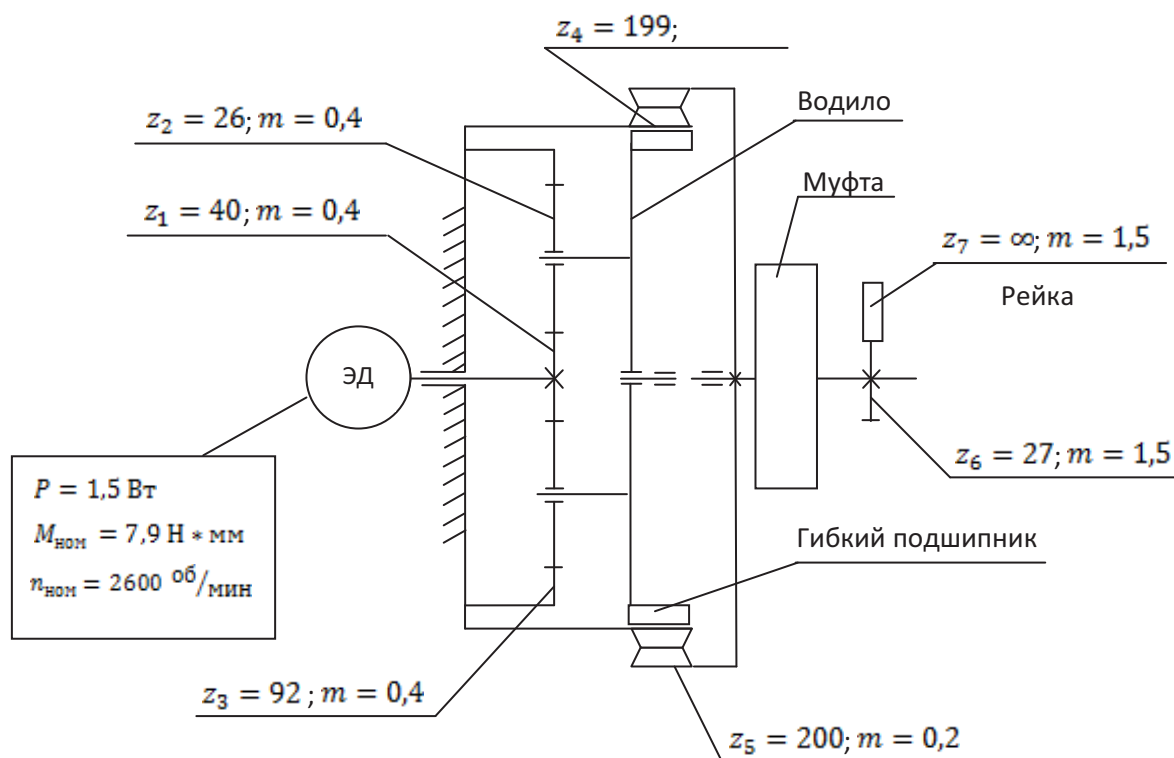


Рис. 1. Кинематическая схема привода

На рисунке 1: ЭД – электродвигатель,  $z_1$  – солнечное колесо,  $z_2$  – сателлиты,  $z_3$  – опорное колесо,  $z_4$  – гибкое колесо,  $z_5$  – жёсткое колесо волновой передачи,  $z_6$  – выходное колесо реечной передачи,  $z_7$  – рейка. Отметим, что муфта и реечная передача выполнены в виде отдельных модулей.

При заданном режиме работы двигателя наиболее применимы шаговые двигатели. Согласно расчету по данным технического задания в приводе установлен шаговый электродвигатель FL28STH51-0674A производства НПО “Атом”.

Характер движения ротора шагового двигателя зависит от частоты и характера изменения импульсов управления. Выделяются четыре режима работы шаговых двигателей: статический (по обмоткам статора протекает постоянный ток, создающий статическое магнитное поле, ротор при этом неподвижен), квазистатический (скорость ротора в начале каждого шага равна нулю), установившийся (частота управляющих импульсов постоянна) и переходный режим (постоянно изменяющаяся управляющая частота). Работа двигателя в переходном режиме удовлетворяет основным требованиям к режимам работы привода: пуск, реверс и торможение.

Основное требование к шаговому двигателю, работающему в переходном режиме, является отсутствие потери шага. Пуск шагового двигателя осуществляется из

неподвижного положения ротора, которое он занимает при установившемся значении тока в обмотках статора. При этом вначале ротор отстаёт от скорости поля, а затем, ускоряясь, опережает её и за счёт отрицательного синхронизирующего момента начинает тормозить. Полное торможение в конце шага осуществляется вследствие демпфирования колебания скорости вращения.

По конфигурации обмоток шаговые двигатели делятся на унipoлярные и биполярные. Используемый в приводе двигатель является биполярным. Биполярный двигатель имеет одну обмотку в каждой фазе, в которой направление тока переключается драйвером при каждом шаге ротора. Биполярный двигатель, в отличие от унipoлярного, развивает большие моменты при малых габаритах. На рис.2 представлена схема включения биполярного двигателя, используемого в приводе.

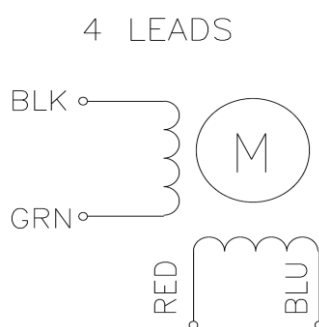


Рис. 2. Схема включения биполярного шагового электродвигателя

Шаговый двигатель не нуждается в системе обратной связи, что означает уменьшение стоимости и габаритов всего изделия в целом. Применение шаговых двигателей позволяет обойтись без дорогого контура скорости и положения, при этом не накапливается ошибка положения вследствие того, что с каждым шагом вала электродвигателя ошибка обнуляется. Шаговые двигатели недороги и просты в изготовлении. Также шаговые двигатели обладают высокой точностью, то есть данный двигатель обеспечивает точное позиционирование рейки и установленного на ней устройства.

Для данной скорости вращения вала шагового электродвигателя (2600 об/мин) и заданных нагрузочных условий, приведённых в таблице 1, разрабатываемый редуктор должен обеспечивать передаточное отношение  $i = 663$ . Такое передаточное отношение является слишком большим для того, чтобы использовать простые цилиндрические зубчатые передачи. Именно поэтому в состав механизма линейных перемещений вошёл волновой зубчатый редуктор, обеспечивающий в данном механизме передаточное отношение  $i = 200$ .

Основные преимущества использования волновых передач:

- возможность реализации в одной ступени при одноволновом генераторе больших передаточных отношений в диапазоне от 80 до 600;
- малый мертвый ход и высокая кинематическая точность;
- возможность передачи движения через герметичную перегородку;
- малый момент инерции, приведенный к входному валу.

Для обеспечения необходимого передаточного отношения  $i = 663$  и увеличения долговечности волновой зубчатой передачи за счёт снятия части нагрузки с передачи недостающее преобразование моментов обеспечивается за счёт двухсателлитной планетарной передачи с передаточным отношением  $i = 3,32$ . Кинематическая схема передачи приведена на рис.1. Ключевой особенностью рассматриваемого в статье механизма является использование гибкого подшипника в конструкции волновой передачи. Конструкция генератора волн с гибким подшипником представлена на рис. 3. Принцип действия схож с принципом действия дискового генератора волн.

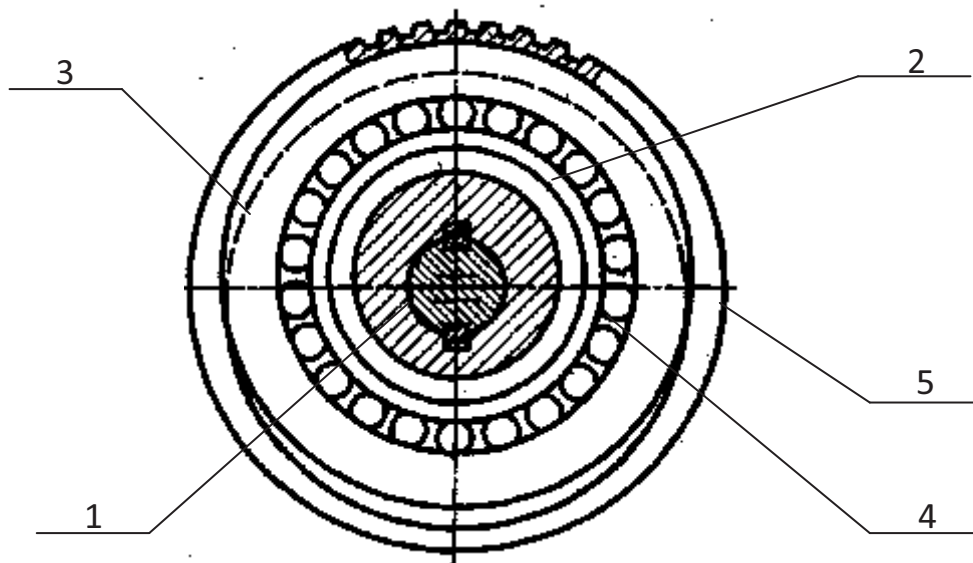


Рис. 3. Конструкция генератора волн с гибким подшипником

Генератор волн с гибким подшипником состоит из эксцентрической втулки 1 (кулачка) и самого гибкого подшипника, состоящего из гибкого внутреннего кольца 2 (эксцентрического, совпадает по форме со втулкой), гибкого внешнего кольца 3, которое в недеформированном состоянии имеет форму окружности, и тел качения 4, разделённых сепаратором. Пунктирной линией показана форма наружного кольца гибкого подшипника в недеформированном состоянии. Гибкое кольцо 5 напаяно на предварительно деформированное наружное кольцо гибкого подшипника. Принцип действия генератора волн заключается в том, что тела качения, перекатываясь по

внутреннему кольцу подшипника, деформируют гибкое наружное кольцо, изначально имеющее правильную форму и радиус, равный радиусу гибкого колеса в недеформированном состоянии. Деформации наружного кольца гибкого подшипника переходит в деформацию гибкого колеса 5 волновой передачи за счёт сил трения и предварительной напрессовки последнего на гибкий подшипник по посадке с натягом.

Использование гибкого подшипника увеличивает количество зубьев гибкого колеса, одновременно находящихся в зацеплении с жёстким колесом волновой передачи. Генератор волн с использованием гибкого подшипника, установленного на кулачок, имеет одну волну деформации, что позволяет достичь больших передаточных отношений при небольших габаритах. Это следует из формулы для расчёта количества зубьев жёсткого колеса для волновой передачи:

$$z_{жк} = i_{взр} \cdot \Delta ,$$

где  $z_{жк}$  – число зубьев жёсткого колеса волновой передачи,  $i_{взр}$  – передаточное отношение волнового зубчатого редуктора,  $\Delta$  – зазор в волновой передаче, в данном случае равный количеству волн генератора. Как видно из формулы, при снижении числа волн с двух до одного общее число зубьев жёсткого колеса тоже уменьшается в два раза, что при постоянном модуле означает уменьшение габаритов. Как было сказано в начале статьи, уменьшение габаритов является основным критерием представленного привода.

По принципу действия представленный генератор волн схож с дисковым одноволновым генератором, но имеет перед ним большое преимущество, заключающееся в меньшем эксцентриситете втулки (кулачка). Меньший эксцентриситет означает меньшие биения при работе всего механизма, что положительно сказывается на долговечности и точности всей передачи.

Единственным недостатком использования гибкого подшипника является повышенная подверженность износу его наружного кольца, находящегося в деформированном состоянии в течение всего периода работы волновой передачи. Этот недостаток не позволял использовать гибкие подшипники в подобных механизмах ранее, в условиях низких технологий изготовления материалов для гибких элементов приборных устройств. Кроме того, до недавнего времени, вплоть до 2000-х годов, не существовало материалов, удовлетворяющих требованиям работы в подобных передачах. Переход технологий на новый уровень привёл к появлению множества упругих материалов, обладающих высокой износостойкостью при достаточно большом коэффициенте упругости. К ним относятся высококачественные сорта технической резины, получившие распространение в последние два десятка лет. В далёкой перспективе для изготовления

сильно нагруженных упругих элементов, таких как наружное кольцо гибкого подшипника в рассматриваемой передаче, предполагается использование гибких сверхпрочных материалов с использованием вставок из графитовых нанотрубок. Новейшие опыты и исследования, проводимые в этой области, уже позволили получить сверхпрочный и сверхгибкий слой из графитовых нанотрубок толщиной в один миллиметр, однако для стабильной работы конструкции будет достаточно слоя в полтора миллиметра. Слой графита можно нанести на поверхность гибкого элемента, например внешнего кольца гибкого подшипника, методом локальной диффузии.

Использование наноматериалов в конструкции привода является весьма отдалённой перспективой, поскольку подобные материалы пока имеют статус экспериментальных и весьма дороги в производстве. Однако уже находящиеся в массовом производстве сорта технической резины, обладающие повышенной износостойкостью, обладают необходимыми для работы в подобном приводе характеристиками.

#### **Список литературы**

1. Элементы приборных устройств курсовое проектирование (в 2-х частях) /О.Ф. Тищенко [и др.] М.: Высшая школа, 1978. С. 110-117
2. *Б.М. Морзилов* «Волновые зубчатые передачи. Достижения и перспективы» /[http://www.reduktor-news.ru/arc/06\\_1/1\\_06\\_26\\_29.pdf](http://www.reduktor-news.ru/arc/06_1/1_06_26_29.pdf) (дата обращения 04.03.2013)
3. Графен – идеальная атомная решётка / Успехи физических наук, 2011. Т. 181, № 12. С. 1283-1284.
4. *Разработка* конструкторской документации при курсовом проектировании: учеб.пособие: В 2 ч. Ч. 1/ И.С. Потапцев, Н.И. Нарыкова, Е.А. Перминова, А.А. Буцев М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2010. 78 с., Ч. 2/ И.С. Потапцев, Н.И. Нарыкова, Е.А. Перминова, А.А. Буцев М. и др.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2012. 80 с.