

УДК 621.83.06

М.Е. ЛУСТЕНКОВ, д-р техн. наук; Е.С. ЛУСТЕНКОВА

Белорусско-Российский университет, г. Могилев

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ СФЕРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ

Выпуск редукторной техники в Республике Беларусь не соответствует потребностям в ней, что приводит к увеличению импорта. Проведен сравнительный анализ различных типов передач, применяемых для создания редукторных узлов электромеханических приводов. Оценены преимущества передач с промежуточными телами качения. Описаны различные конструкции сферических роликовых передач и показано их развитие. Определена наиболее рациональная конструктивная схема одноступенчатой сферической роликовой передачи с двухрядным сателлитом, обеспечивающая реализацию передаточных отношений в диапазоне 30...200 при низкой удельной массе редуктора.

Ключевые слова: механическая передача, редуктор, сферический механизм, кулачок, ролики

Введение. В Республике Беларусь изготавливаются зубчатые передачи для приводных систем транспортных средств, в частности на ОАО «БЕЛАЗ» налажен выпуск зубчатых передач для приводов трансмиссий карьерных самосвалов. В то же время производство редукторов и мотор-редукторов как отдельных узлов для различных отраслей промышленности развито слабо. Цевочно-циклоидальные редукторы производятся на ЗАО «Белробот» [1], ОАО «ТАИМ» изготавливает трехступенчатые коническо-цилиндрические редукторы для транспортеров [2], ОАО «Молодеченский станкостроительный завод» освоил производство планетарных редукторов (передаточное отношение равно 41,5) для сельскохозяйственной техники [3]. В то же время анализ закупок, совершаемых отечественными предприятиями (только на тендерной основе), свидетельствует о значительной потребности в редукторной технике, составляющей десятки тысяч редукторов в год.

Как правило, редукторные механизмы применяются в составе электромеханического привода. Наиболее востребованными электромеханические приводы являются для трубопроводной арматуры и грузоподъемных механизмов [4]. Данные приводы являются низкооборотными и предполагают значительную редукцию скорости вращения вала электродвигателя, при передаче движения на рабочий орган машины. Компактные редукторные модули также широко используются при проектировании роботов и робототехнических комплексов. Наиболее подходящими для применения в их приводах являются малоинерционные двигатели с постоянными магнитами, т. к. они имеют малые массогабаритные показатели, высокие динамические параметры для воспроизведения сложных алгоритмов управления и способны быстро реагировать на управляющие сигналы. Но эти двигатели имеют высокие частоты вращения и небольшие моменты [5], что также предполагает использование механической редукторной ступени с большими значениями передаточных отношений.

Анализ различных типов механических передач. При проектировании редуцирующего узла с большим передаточным отношением возникает альтернатива: использовать набор последовательно соединенных эвольвентных зубчатых передач или использовать передачи других типов. Первый вариант приводит к увеличению габаритов и массы привода, увеличению мертвого хода

из-за последовательного выбора зазоров и снижению надежности системы. Одной из тенденций развития автоматизированного электропривода является приближение источника движения к исполнительному органу [7]. Это позволяет снизить массогабаритные параметры и повысить жесткость системы, соответственно повышаются точность перемещений и быстродействие. В связи с этим при неизбежности использования механической редукторной ступени в составе низкооборотного электромеханического привода, передача для ее создания должна иметь высокую нагрузочную способность, низкую материалоемкость, в т. ч. малые габаритные размеры. На рисунке 1 показаны промышленно реализуемые передаточные отношения для различных типов силовых передач в одноступенчатом исполнении.

Известно, что использование некоторых схем 3К и 2К-Н (по классификации В.Н. Кудрявцева [9]) для проектирования редукторов с двухвенцовыми сателлитами при подборе чисел зубьев определенным образом может обеспечить передаточное отношение до 10 000. Однако чрезвычайно низкий КПД, неуравновешенность и сложность конструкции не позволяют использовать эти схемы для силовых приводов общемашиностроительного назначения. Использование червячных передач позволяет реализовать передаточные отношения в диапазоне 8...80 (для силовых приводов рекомендовано до 60), что для одноступенчатых передач низ-

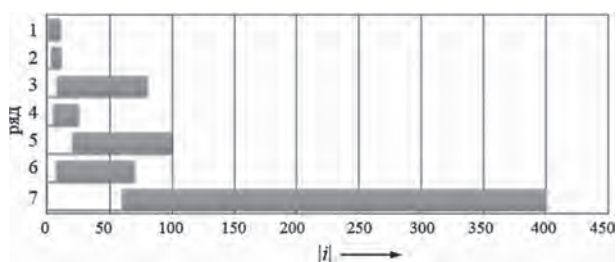


Рисунок 1 — Диапазоны реализуемых передаточных отношений одноступенчатых передач:

ряд 1 — цилиндрические зубчатые (1...10); ряд 2 — планетарные по схеме 2К-Н с одновенцовыми сателлитами (3, 15...12,5) [7]; ряд 3 — червячные (8...80) [8]; ряд 4 — планетарные по схеме 2К-Н с двухвенцовыми сателлитами (5...25) [8]; ряд 5 — планетарные по схеме 3К [8]; ряд 6 — планетарные зубчатые и цевочные по схеме К-Н-V (7...70) [8]; ряд 7 — волновые (63...400) [7]



кооборотных приводов часто бывает недостаточным. Дополнительными недостатками являются низкий КПД, особенности компоновки, такие как перекрещивающиеся оси валов, что затрудняет применение червячных передач в некоторых кинематических цепях. Отметим, что выпуск планетарных редукторов с высокими эксплуатационными характеристиками налажен ведущими зарубежными производителями, такими как Apex Dynamics (США), SEW Eurodrive, Inc. (Германия), Brevini Riduttori (Италия) и др., и с учетом демпинга азиатских компаний данный сегмент рынка имеет высокую насыщенность.

В последнее время развитие получили цевочные передачи с циклоидальным зацеплением, разработкой которых занимаются фирмы SPINEA (Словакия), Sumitomo (Япония) и др., обеспечивающие редукцию скорости на уровне червячных передач. Волновые передачи высокого технического уровня серийно производятся компанией Harmonic Drive (Германия). Этот вид передач является практически единственным, позволяющим в одноступенчатом исполнении обеспечить диапазон передаточных отношений 80...315 [7]. Их недостатками являются сложность изготовления и низкая крутильная жесткость гибкого элемента.

К волновому и планетарному типу относят также передачи с промежуточными телами качения (ППТК). К настоящему времени разработано множество конструкций, некоторые из которых способны обеспечить диапазон передаточных отношений 30...200. Основными преимуществами ППТК являются:

- нагрузка передается по множеству параллельных потоков (тел качения), что позволяет снижать материалоемкость, уменьшать габариты привода (Показатель, численно характеризующий данное преимущество, — среднее число тел качения, передающих нагрузку. Его можно условно назвать коэффициентом перекрытия);
- с помощью тел качения можно осуществить замену скольжения сопротивлением качению, которое сопровождается малыми потерями мощности, и повысить КПД передач;
- широкие кинематические возможности, характерные для передач планетарного типа и компоновочные преимущества для встраивания в кинематическую цепь электромеханического привода (соосность валов, малые габариты и др.).

В Белорусско-Российском университете еще в 80-х годах прошлого столетия сформировалась научная школа по данному направлению. Около десятка лет назад началась разработка передач сферического типа. В отличие от планетарных зубчатых и цевочно-циклоидальных передач, сферические передачи более уравновешены, т. к. сателлит установлен не на эксцентрик, а на наклоненном участке ведущего вала — кривошипе.

Развитие конструкций сферических передач. Первые экспериментальные конструкции передач содержали составные тела качения, не закрепленные на общем основании, аналогом являлись известные синусошариковые передачи [10]. Был разработан редукторный механизм с передаточным отношением редукторной части, равным 5 (рисунок 2), при этом обеспечивалась возможность изменения угла наклона валов механизма с помощью двух карданных шарниров. В передаче использовались ролики, состоящие из трех элементов: стержня и двух втулок. Три элемента роликов теоретически могут осуществлять «чистое» качение одновре-



а

б

Рисунок 2 — Сферическая передача с незакрепленными роликами: а — механизм в сборе; б — основные узлы

менно по поверхностям трех основных элементов передачи, содержащих беговые дорожки и пазы.

Диапазон передаточных отношений, которые можно было получить применяя данную конструкцию, составлял 2...12. Передача имела низкий КПД (около 0,84...0,86 при оптимизированной геометрии зацепления и невысоких нагрузках) и низкую надежность из-за возможности заклинивания одного или нескольких роликов вследствие перекоса их осей.

Более прогрессивной являлась разработанная конструкция передачи с роликами со сферическими концами, установленными с равномерным шагом в отверстиях сателлита (рисунок 3). Ролики выполняли функции зубьев со сферическим профилем. Установленные в сателлите по переходным посадкам, они имели возможность осуществлять качение по беговым дорожкам. Передаточное отношение разработанного образца равно 6. Важным конструктивным преимуществом, повышающим уравновешенность системы, являлось совпадение центра масс сателлита с центром его сферического движения и размещение его на оси передачи. К недостаткам данных редукторных узлов относятся тот же узкий диапазон передаточных отношений, используемый принцип силового замыкания высших кинематических пар, образуемых телами качения и необходимость проектирования угловой муфты для передачи вращения от сателлита на ведомый вал. Муфта снижала нагрузочную способность и КПД редуктора, усложняла его конструкцию, от ее надежности зависела надежность всего механизма.

На следующем этапе исследований была разработана конструкция и создан экспериментальный образец мехатронного модуля второго уровня — мотор-редуктора с системой управления (рисунок 4), редукторная часть которого имела передаточное отношение, равное —34. Ряд роликов, установленных в отверстиях в сателлите, одновременно контактировал с беговой дорожкой, образованной корпусными сферическими кулачками и сферическим кулачковым профилем выходного



а

б

Рисунок 3 — Редуктор на основе сферической прецессирующей передачи: а — основные узлы; б — редуктор в сборе



Рисунок 4 — Мотор-редуктор на основе сферической прецессирующей передачи:
a — основные узлы; *б* — механизм в сборе

вала. Отпала необходимость в проектировании угловой муфты. Кинематические возможности передачи повысились, однако интенсивный износ роликов вследствие большого скольжения в передаче приводил к нагреву и снижению долговечности редуктора, т. к. обеспечить «чистое» качение во всех кинематических парах не представлялось возможным.

К настоящему времени разработаны наиболее перспективные конструктивные схемы сферических роликовых передач с двухрядным сателлитом (рисунок 5), в котором ряды роликов расположены коаксиально. Это позволило значительно расширить кинематические возможности проектируемых приводных систем, реализовав необходимый диапазон передаточных отношений. Экспериментальные исследования мотор-редуктора (см. рисунок 5 *в*) показали, что он обеспечивает передачу вращающего момента 15 Н·м при массе редукторной части 1,762 кг (максимальный диаметр корпуса 82 мм, длина редукторного узла, с учетом длины выходного конца ведомого вала, равна 91 мм) и передаточном отношении, равном –44. Удельная масса редуктора, таким образом, составляет 0,117 кг/Н·м. При имеющихся резервах улучшения конструкции, направленных на повышение равномерности распределения нагрузки по потокам, возможно достичь значения этого показателя 0,1 кг/Н·м

и ниже, что будет соответствовать высокому техническому уровню редуктора [7]. В отличие от известных зубчатых планетарных передач с коническими зацеплениями, в сферическом роликовом зацеплении выше коэффициент перекрытия, т. к. в контакте роликов и беговых дорожек рассматриваемой передачи осуществляется геометрическое замыкание высших кинематических пар.

Белорусско-Российским университетом в 2014 году приобретен пакет программ ANSYS Mechanical и CFX (коммерческая лицензия), ранее приобретен САПР «тяжелого» уровня Siemens NX (академическая лицензия), а в 2016–2018 годах закуплены модули программного комплекса SolidWorks (коммерческая лицензия). Это позволяет проводить компьютерное моделирование и инженерный анализ на высоком уровне, значительно снизив затраты на проектирование и ускорив этот процесс. Для изготовления деталей сферических передач используются два обрабатывающих центра HAAS, позволяющие получать сложные кулачковые поверхности, центральной профиль которых расположен на сфере (рисунок 6).

Таким образом, разработанная схема передачи (см. рисунок 5) является наиболее перспективной для промышленной реализации.

Заключение. При выборе передачи для редукторной ступени низкооборотного электромеханического привода целесообразным решением будет использование сферических роликовых передач с двухрядным сателлитом, спроектированными по схеме 2К-Н. Их применение позволяет реализовать диапазон передаточных отношений 30...200 и разрабатывать редукторные модули с удельной массой менее 0,1 кг/Н·м, не уступающие известным зарубежным аналогам. Сателлит проектируется составным, чтобы траектории центров масс роликов обоих рядов находились на коаксиально расположенных сферических поверхностях. Для повышения уравновешенности передач необходимо, чтобы средние плоскости центровых профилей кулачков, образующих

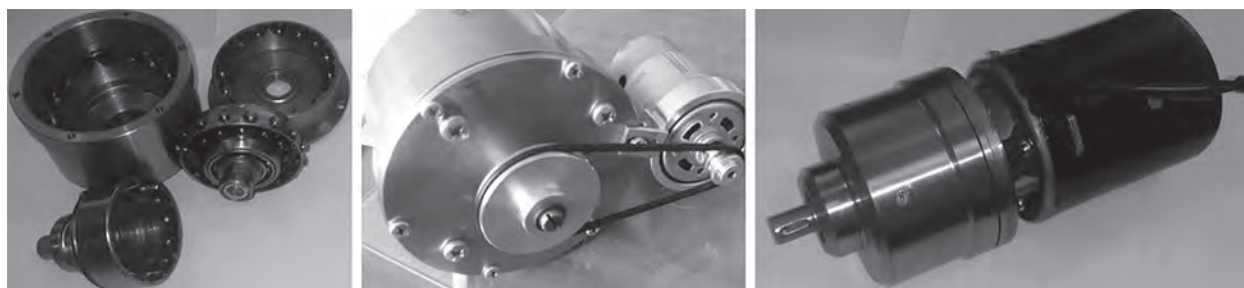


Рисунок 5 — Экспериментальные образцы сферических роликовых передач:
a — детали редукторного узла; *б* — минипривод; *в* — мотор-редуктор

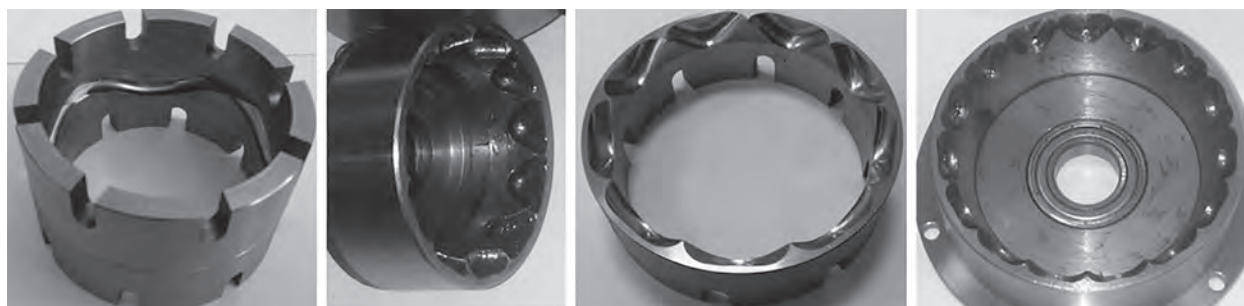


Рисунок 6 — Кулачки сферических роликовых передач

беговые дорожки, проходили через центр сферического движения спутника, а данный центр лежал на оси передачи. В настоящее время разрабатываются основы расчета и уточняются отдельные элементы конструкций.

Список литературы

1. Приводная техника [Электронный ресурс] // Белробот. — Режим доступа: http://www.belrobot.by/section/selected_section?v:109.htm. — Дата доступа: 23.05.2018.
2. Редукторы техника [Электронный ресурс] // ТАИМ. — Режим доступа: <https://taim.by/WebSite/Products/Редукторы>. — Дата доступа: 23.05.2018.
3. Продукция [Электронный ресурс] // ОАО «Молодечненский станкостроительный завод». — Режим доступа: <http://www.mcz.by/produkcija.html>. — Дата доступа: 23.05.2018.
4. Перспективы развития технологии и рынка приводных решений: куда движется привод [Электронный ресурс] / С.А. Алексанин [и др.] // Современные технологии управления. — 2013. — № 11 (35). — Режим доступа: <http://sovman.ru/article/3501>. — Дата доступа: 23.05.2018.
5. Михайлов, О.П. Гибкие производственные системы, промышленные роботы, робототехнические комплексы: практич. пособие: в 14 кн. / О.П. Михайлов, Р.Т. Орлова, А.В. Пальцев; под ред. Б.И. Черпакова. — М.: Высш. шк., 1989. — Кн. 14: Современный электропривод станков и промышленных роботов.
6. Коробко, Г.И. Автоматизированные электроприводы объектов водного транспорта: методич. пособие / Г.И. Коробко, В.В. Лебедев. — Нижний Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2016. — 32 с.
7. Проектирование механических передач: учеб. пособие / С.А. Чернавский [и др.]. — 7-е изд., переб. и доп. — М.: ИНФРА-М, 2013. — 536 с.
8. Заблонский, К.И. Встроенные редукторы / К.И. Заблонский, А.Е. Шустер. — Киев: Техника, 1969. — 176 с.: ил.
9. Кудрявцев, В.Н. Планетарные передачи / В.Н. Кудрявцев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1966. — 307 с.
10. Игнатищев, Р.М. Синусошариковые редукторы / Р.М. Игнатищев. — Минск: Вышэйш. шк., 1983. — 107 с.: ил.



Lustenkov M.E., Lustenkova E.S.

Improvement of constructions of spherical gears with intermediate rolling elements

Production of gears and speed reducers in the Republic of Belarus does not meet need for them, which leads to an increase in imports. A comparative analysis of different gears types for speed reducers of electromechanical drives is considered. The advantages of transmissions with intermediate rolling elements are estimated. Various designs of spherical roller gears are described and their development is shown. The most rational design scheme of a single-stage spherical roller gear with a two-row satellite providing the implementation of the transfer ratios in the range of 30...200 at a low specific weight of the gearbox is determined.

Поступил в редакцию 30.05.2018.