



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

УДК 621.83.06

М.Е. ЛУСТЕНКОВ, канд. техн. наук; И.С. САЗОНОВ, д-р техн. наук
Белорусско-Российский университет, г. Могилев

ПЕРЕДАЧА С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ С КВАЗИВИНТОВОЙ ФОРМОЙ БЕГОВЫХ ДОРОЖЕК

В статье рассмотрены вопросы создания механических передач с промежуточными телами качения для механизмов и устройств, работающих в трубах и скважинах. Приведены алгоритмы расчета геометрии беговых дорожек, позволяющих изготавливать их на универсальном оборудовании. Приведена методика расчета профиля режущего инструмента. Работоспособность передачи подтверждена экспериментально.

Ключевые слова: механическая передача, тела качения, беговые дорожки, редуктор, КПД

Введение. В последнее время разработчики приводных систем все чаще обращают внимание на передачи с промежуточными телами качения (ППТК). Они позволяют заменить трение скольжения качением, повысить компактность и нагрузочную способность редуцирующих механизмов вследствие многопоточности, обладают широкими кинематическими возможностями. Разработано множество конструкций передач данного типа [1]. То, что работы в данном направлении являются актуальными, подтверждает все возрастающая активность, проявляемая российскими разработчиками и фирмами дальнего зарубежья. ППТК используются в приводах перемешивателей бурового раствора, запорной и запорно-регулируемой арматуры [2], приводах беспилотных летательных аппаратов [3] и других механизмах, в т. ч. в космической отрасли [4].

ППТК, разрабатываемые в Белорусско-Российском университете, обладают рядом преимуществ, позволяющих применять их для решения инженерных задач, специфика которых связана с работой в пространствах, ограниченных по диаметру, например, в скважинах или трубах. О масштабах практической реализации синусошариковых редукторов [5], разрабатываемых в 70–80 годах прошлого столетия в Могилеве и применяемых в качестве редукторных вставок для турбобуров и электробуров, свидетельствует внесение информации о них в ГОСТ 15880 83. За рубежом по направлению исследований малогабаритных в радиальном направлении ППТК приобрела известность научная школа румынского технического

университета из Клуж-Напоки [6]. В последние десятилетия интенсивность работ в данном направлении снизилась. Однако в настоящее время, когда появилось технологическое оборудование нового поколения, позволяющее изготавливать поверхности любой сложности, а также мощные программные средства математического анализа и системы автоматизированного проектирования, задачи разработки и совершенствования ППТК вновь обрели актуальность.

Структура, принцип работы передачи и постановка задачи. На рисунке 1 показаны детали одной секции синусошарикового редуктора, являющегося прототипом разрабатываемой конструкции, и секция в сборе. Она состоит из внутренней втулки 1 с замкнутой синусоидальной беговой дорожкой, сепаратора 2, наружной втулки 3 с замкнутой синусоидальной беговой дорожкой на внутренней поверхности и тел качения (шариков) 4. При вращении втулки 1 шарики перемещаются по ее беговой дорожке, по беговой дорожке неподвижной наружной втулки 3 и движутся вдоль пазов сепаратора 2, одновременно поворачивая его со скоростью меньшей, чем скорость входного звена 1. Передаточное число зависит от числа периодов беговых дорожек (Z_1 и Z_3) и не зависит непосредственно от диаметральных габаритов передачи ($u = 1 + Z_3 / Z_1$), в отличие от зубчатых передач. В одной ступени можно реализовать диапазон передаточных чисел 1–12 при максимальном диаметре корпуса около 120 мм.

Беговые дорожки формируются при движении инструмента по периодическим кривым (однопе-

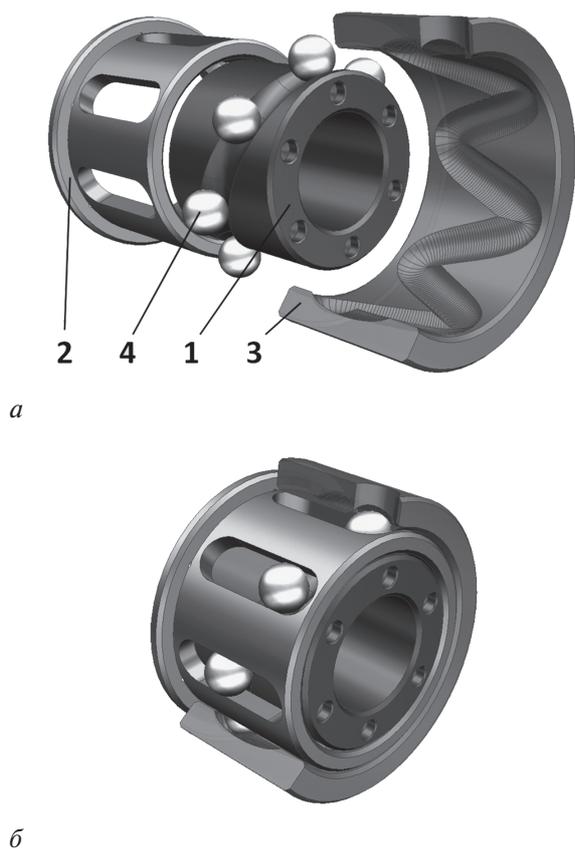


Рисунок 1 — Основные детали одной секции синусошарикового редуктора (а) и секция в сборе (б)

риодной на внутреннем ведущем звене и многопериодной на наружном остановленном звене) с одинаковыми амплитудами A . Эти кривые расположены на цилиндрической поверхности с радиусом образующей окружности, равным R , и в модели передачи являются *центральными кривыми зацепления*.

Были предложены конструкции передачи, в которых беговые дорожки образованы двумя торцовыми кулачками (внутренними и наружными), закрепляемыми на общем основании [7]. Это позволяет осуществлять регулировку зацепления, компенсировать износ кулачков их периодическим смещением вдоль оси передачи и повысить технологичность изготовления беговых дорожек. Торцовые поверхности кулачков образуются перемещением центра сферической фрезы (для шариковых передач) по заданной траектории (центральной кривой) либо согласованием движения вертикальной подачи цилиндрической фрезы с вращением заготовки. В качестве центральных кривых чаще всего используют синусоиды.

Несмотря на совершенствование станочного парка, возможность обработки сложных поверхностей на дорогостоящих обрабатываемых центрах есть не у каждого предприятия. В некоторых случаях целесообразным видится упрощение формы беговой дорожки, которая позволила бы изготавливать детали передачи на универсальном

оборудовании и тем самым снизить затраты на ее производство [8]. На рисунке 2 показаны кулачки с трапецеидальным профилем впадин (а) и с профилем впадины в виде окружности (б). Изготовление впадин (профиля) кулачков производится известным методом копирования. Фрезерование может осуществляться на универсальном оборудовании стандартным режущим инструментом с применением делительной головки. Оправданность упрощения профиля беговых дорожек должна тщательно оцениваться вследствие вносимых погрешностей в картину зацепления, нарушения постоянства контакта тел качения и беговых дорожек и ухудшения динамики передачи (возникновение вибраций и шума). Зачастую необходима доработка канавок для обеспечения работоспособности передачи.

Была поставлена обратная задача. Предположим, задан трапецеидальный многопериодный профиль кулачка, изготовленный стандартным режущим инструментом на универсальном оборудовании. Задачами настоящего исследования являлись вывод уравнения центральной кривой для этого кулачка, вывод уравнения сопряженной с ней однопериодной кривой, позволяющей осуществить зацепление с постоянным передаточным отношением и определение геометрии инструмента для изготовления кулачков.

Вывод уравнений квазивинтовых кривых на цилиндрической поверхности. Инструмент оставляет на цилиндрической трубчатой заготовке трапецеидальный или треугольный профиль впадины (фреза конической формы, либо поочередное фрезерование цилиндрической фрезой под углом — рисунок 3). Этот профиль в виде ломаной MBC будем рассматривать как фрагмент многопериодной замкнутой кривой. Данная многопериодная кривая располагается в пространстве таким образом, что в плоскости O_1MB мы будем наблюдать не окружность, а многоугольник вписанный в окружность, радиусом R , имеющий число сторон, равное Z_3 и с длиной стороны, равной MB .

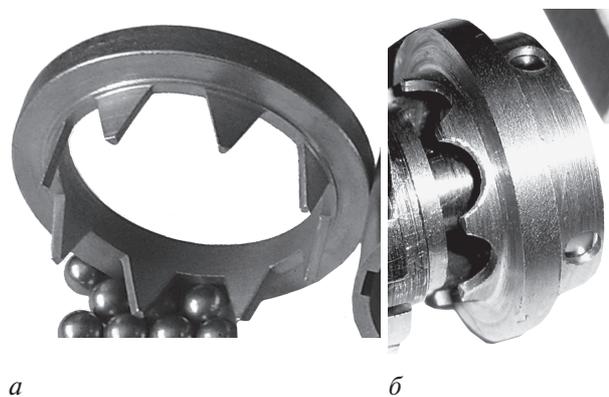


Рисунок 2 — Наружные кулачки с упрощенной формой беговых дорожек

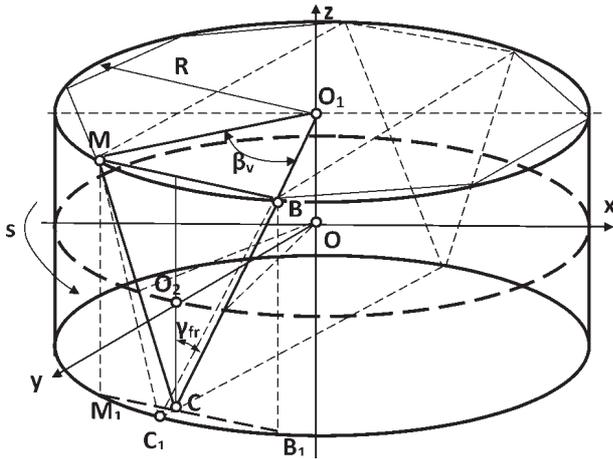


Рисунок 3 — К выводу уравнений кривых

Длина дуги MB , центральный угол β_n и длина отрезка MB , соответственно определяются:

$$l_v = 2\pi R/Z_3, \quad \beta_v = 2\pi/Z_3, \quad MB = 2R \sin(0,5\beta_v). \quad (1)$$

Расположим ломаную MCB , повторенную Z_3 раз, на плоскости и найдем уравнение, которое будет определять полученную многопериодную кривую. Ранее было получено уравнение развертки на плоскость многопериодной кусочно-винтовой линии, размещенной на цилиндрической поверхности с радиусом R образующей окружности [7]:

$$z_3(s) = -\frac{2A}{\pi} \arcsin \left(\cos \left(\frac{Z_3 s}{R} \right) \right),$$

где s — параметр (дуговая координата), изменяемый от 0 до $2\pi R$.

В рассматриваемом случае это будет также кусочно-винтовая линия, построенная, однако, с учетом коэффициента kzs . Данный коэффициент показывает, во сколько раз длина расположения Z_3 периодов искомой кривой вдоль оси Oz меньше длины расположения кривой на развертке цилиндрической поверхности вдоль той же оси, т. е. во сколько раз сумма длин хорд меньше длины окружности:

$$kzs = \frac{2\pi R}{Z_3 \cdot AB} = \frac{\pi}{Z_3 \sin(\pi/Z_3)}. \quad (2)$$

Тогда уравнение искомой кривой на развертке:

$$z_3(s) = -\frac{2A}{\pi} \arcsin \left(\cos \left(\frac{kzs \cdot Z_3 s_1}{R} \right) \right), \quad (3)$$

$$s_1 = -\frac{\beta_v}{2} R \dots \frac{\beta_v}{2} R.$$

При прохождении инструмента треугольной формы (профиль MBC) через тело заготовки на цилиндрической поверхности останется след MC_1B . Для нахождения уравнения развертки этого

следа на плоскость необходимо совместно решить систему двух уравнений. Одно из них определено выражением (3). Другое представлено следующей зависимостью:

$$s_1 = R \arcsin \left(\frac{s}{R} \right), \quad s = -\frac{\beta_v}{2} R \dots \frac{\beta_v}{2} R. \quad (4)$$

Рассмотрим кривые зацепления со следующими параметрами: $R = 30$ мм; $A = 10$ мм; $Z_1 = 1$; $Z_3 = 4$.

Выразив из (4) параметр s и подставив его в выражение (3), получим следующие уравнения для однопериодной и многопериодной кривых, описывающие развертку следа фрезы треугольной формы, проходящей через цилиндрическую поверхность, как функции $z_i(s)$:

$$z_1(s) = -\frac{2A}{\pi} \arcsin \left(\cos \left(kzs \left(\sin \left(\frac{s}{R} \right) \right) \right) \right); \quad (5)$$

$$z_3(s) = -\frac{2A}{\pi} \arcsin \left(\cos \left(kzs \left(Z_3 \sin \left(\frac{s}{R} \right) \right) \right) \right). \quad (6)$$

Винтовая линия, развернутая на плоскость, представляет собой прямую. В данном случае отрезки прямых, спроецированные на цилиндрическую поверхность, и данные проекции, впоследствии вновь развернутые на плоскость, назовем квазивинтовыми линиями (кривыми).

На основании уравнения (6) развертки кривой, описывающей одну впадину профиля, было получено уравнение центральной квазивинтовой многопериодной кривой на плоской развертке

$$z_3(s) = -\frac{2A}{\pi} \arcsin \left(\cos \left(kzs \left(Z_3 \times \sin \left(\left(s - \frac{\pi R}{Z_3} \left[\frac{sZ_3}{\pi R} \right] + \left| \sin \left(\frac{\pi}{2} \left[\frac{sZ_3}{\pi R} \right] \right) \right| \right) \frac{1}{R} \right) \right) \right) \right); \quad (7)$$

где квадратными скобками выделена операция выделения целой части числа.

По разработанному ранее алгоритму синтеза кривых [7] было получено уравнение однопериодной кривой, обеспечивающей зацепление с постоянным передаточным отношением:

$$z_1(s) = -\frac{2A}{\pi} \arcsin \left(\cos \left(kzs \left(Z_3 \times \sin \left(\left(\frac{s}{Z_3} - \left(\pi R \left[\frac{s}{\pi R} \right] + \frac{\pi R}{Z_3} \left| \sin \left(\frac{\pi}{2} \left[\frac{s}{\pi R} \right] \right) \right| + \frac{\pi R}{Z_3} \left[\frac{s}{\pi R} \right] \right) \right) \frac{1}{R} \right) \right) \right) \right); \quad (8)$$

Взаимодействие двух кривых в пространстве показано на рисунке 4.

При перемещении центра сферической либо цилиндрической фрезы по данным центральным кривым образуется беговая дорожка. На плоской развертке ее нижняя граница в системе $zk_i(sk_i)$ будет определяться, исходя из решения системы трех уравнений [7]:

$$\gamma_{frs} = \arctg \left(\frac{P_2 P_3 + P_2 P_4}{CP_3 + \Delta z k_3} \right). \quad (13)$$

Таким образом, фреза конической формы (впадина) будет иметь следующие геометрические параметры: диаметр фрезы (ширина впадины) по верхней плоскости детали $D_{1fr} = MB$, угол конусности γ_{frs} . Высота профиля фрезы (высота впадины) и диаметр фрезы (ширина впадины) по нижней плоскости впадины, соответственно:

$$H_{fr} = A + \Delta z_{3max} + r_s, \quad D_1 = 2(\Delta z k_3 - r_s) \operatorname{tg}(\gamma_{frs}). \quad (14)$$

Решенные задачи не устраняют необходимость изготовления однопериодной беговой дорожки на специализированном оборудовании (станках и обрабатывающих центрах с ЧПУ) координатным методом.

Для проверки работоспособности зацепления в системе Siemens NX (Unigraphics) была создана модель передачи с телами качения в виде шариков. Симуляция движения в блоке программы Motion Simulation при неподвижном корпусе, вращающемся входном звене с постоянной средней скоростью, подтвердила работоспособность передачи и продемонстрировала вращение выходного вала также с постоянной скоростью. Кинематическая погрешность определялась заданными зазорами в контакте шариков и беговых дорожек.

На основе полученных уравнений, разработанной методики по определению КПД и оптимизации геометрических параметров зацепления [9] были разработаны 3D-модели передачи и разработана документация на изготовление редуктора с телами качения в виде роликов (рисунок 6). Ролики выполнены составными: на стержне-основании размещены втулки со сферической и цилиндрической поверхностями, имеющие возможность вращения относительно стержня. Это позволило снизить

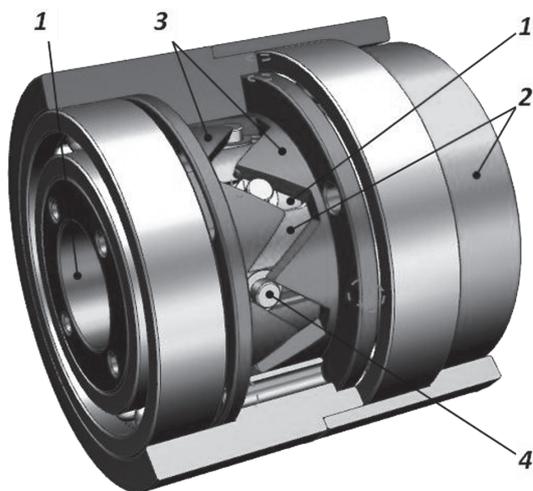


Рисунок 6 — Основные детали зацепления и редуктор с составными роликовыми сателлитами и квазивинтовым профилем беговых дорожек: 1 — внутренний кулачок; 2 — сепаратор; 3 — составной наружный кулачок; 4 — тела качения (ролики)

потери на трение скольжения, так как, контактируя одновременно с тремя поверхностями, составляющие ролика могут обеспечивать качение без проскальзывания. Применение роликов также повышает нагрузочную способность по сравнению с шариковыми передачами вследствие увеличения длины контактных линий.

По результатам исследований был разработан макет редуктора для редукторной вставки электробура [10]. Редукторная секция имеет наружный диаметр 96 мм, сквозное отверстие диаметром 30 мм для прохода промывочной жидкости. Передаточное отношение равно 8. На рисунке 7 показаны детали секции и секция в сборе. Данный редуктор был испытан на стенде в Лаборатории испытаний механических приводных систем Белорусско-Российского университета.

Результаты испытаний подтвердили работоспособность созданной конструкции и рассчитанные кинематические параметры. КПД редуктора при термообработанных поверхностях пазов сепаратора и рабочих поверхностях кулачков составил около 55 %, при термообработанных деталях и использовании смазки в виде графито-масляной смеси составил свыше 70 % при частотах вращения вала двигателя в диапазоне 1000–1500 об/мин и крутящем моменте на выходном валу 140 Нм. Разработанные ранее шариковые



а



б

Рисунок 7 — Детали редукторной секции (а) и редукторная секция в сборе (б)

ковые редукторы с сопоставимыми габаритными размерами не показывали КПД выше 65 %. Их нагрузочная способность не превышала 100 Нм.

Выводы. Разработанные алгоритмы позволяют по заданному передаточному отношению и максимально допустимым радиальным габаритам определить геометрические параметры беговых дорожек и спроектировать инструмент для изготовления рабочих поверхностей торцовых кулачков, образующих многопериодную беговую дорожку. Эта беговая дорожка обеспечивает постоянство контакта с роликами, а рабочие поверхности многопериодных кулачков можно изготавливать на универсальном оборудовании. Однопериодную беговую дорожку необходимо изготавливать на специализированных обрабатывающих центрах с ЧПУ, однако трудоемкость ее изготовления меньше, чем у многопериодной дорожки.

Применение составных роликовых в конструкции передачи сателлитов позволило повысить КПД и нагрузочную способность передачи по сравнению с шариковыми передачами на 5–10 %. Для повышения нагрузочной способности в условиях реальной работы в скважинах передачи данного типа делаются многосекционными с параллельным соединением секций.

Исследуемые передачи могут применяться в механизмах и устройствах, работающих в условиях стесненных диаметральных размеров. В связи с тем, что проектирование и производство электробуров связано со значительными финансовыми вложениями, применение ППТК в этой области рассмат-

ривается как перспективное. В настоящее время созданы и практически эксплуатируются такие средства механизации со встроенными редуцирующими узлами на базе ППТК, как баллонные ключи, гайковерты и т. д.

Список литературы

1. Становской, В.В. Передачи со свободными телами качения, обзор патентной литературы / В.В. Становской, Т.А. Ремнева, С.М. Казакиявичус / Прогрессивные зубчатые передачи: сб. науч. тр. — Новоуральск: Изд. НГТИ, 2003. — 152 с.: ил. — С. 61–94.
2. Панкратов, Э.Н. Волновые редукторы с промежуточными звеньями // Э.Н. Панкратов, В.В. Шумский, С.В. Лушников // Бурение и нефть. — 2003. — № 2. — С. 28–30.
3. Степанов, В.С. Методика проектирования привода на основе волновой передачи с телами качения: автореф. дисс...канд. техн. наук 05.02.02. — М.: ГТУ МАИ, 2009. — 20 с.: ил.
4. Янгулов, В.С. Проектирование передач с линейными перемещениями выходного звена: учеб. пособие / В.С. Янгулов. — Томск: Изд-во ТПУ, 2011. — 169 с.: ил.
5. Игнатищев, Р.М. Синусошариковые редукторы / Р.М. Игнатищев. — Минск: Выш. шк., 1983. — 107 с.: ил.
6. Vora, M. Designing Aspects Of Cylindrical Transmission / M. Vora // ASME Conf. Proc. 5–10 Nov. 2006. — Chicago, Illinois, 2006. — Pp. 75–81.
7. Лустенков, М.Е. Передачи с промежуточными телами качения: определение и минимизации потерь мощности: монография / М.Е. Лустенков. — Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2010. — 274 с.: ил.
8. Лустенков, М.Е. Расчет геометрии адаптированного профиля эллипсной шариковой передачи / М.Е. Лустенков // Технология машиностроения. — 2005. — № 5. — С. 36–38.
9. Определение оптимальной геометрии зацепления посредством промежуточных тел качения на основе анализа его пространственной модели / И.С. Сазонов [и др.] // Вестн. Бел.-Рос. ун-та. — 2012. — № 3 (36). — С. 53–63.
10. Совершенствование конструкции передач с промежуточными телами качения // И.С. Сазонов [и др.] // Горная механика и машиностроение. — 2012. — № 1. — С. 74–83.

Lustenkov M.E., Sazonov I.S.

Transmission with intermediate rolling elements with quasi-helical race tracks

The paper is devoted to questions of creation of mechanical transfers with intermediate rolling elements for mechanisms and the devices working in drilling rods and pipes. Algorithms of calculation of geometry of the racetracks are resulted. These algorithms are allowing to make racetracks on the universal equipment. The design procedure of a profile of the cutting tool is resulted. Working capacity of transmission is confirmed experimentally.

Поступила в редакцию 10.09.2012.