

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-6-76-93

УДК 62-233.3/9

ОБЗОР ЗУБЧАТЫХ ЗАЦЕПЛЕНИЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ПРОФИЛЯМИ ЗУБЬЕВ

REVIEW OF GEAR TRAINS WITH DIFFERENT PROFILES OF THE TEETH OF THE GEAR

Дубов Георгий Михайлович¹,

кандидат техн. наук, доцент, e-mail: nikokem@mail.ru

Georgiy M. Dubov¹, C. Sc. (Engineering), Associate professor

Трухманов Дмитрий Сергеевич^{1,2},

ст. преп., инженер-конструктор I категории,

e-mail: trizart@mail.ru

Dmitriy S. Trukhmanov^{1,2}, Senior Lecturer, Design Engineer

Лопасова Екатерина Сергеевна¹,

магистрант, e-mail: lady.lopasova@mail.ru

Ecaterina S. Lopasova¹, master student

Ельцов Иван Евгеньевич¹,

студент, e-mail: t-pain99@yandex.ru

Ivan E. Eltsov¹, student

Тимофеев Роман Андреевич¹,

студент, e-mail: segretoru@gmail.com

Roman A. Timofeev¹, student

Фоминых Павел Алексеевич¹,

студент, e-mail: Pavel-fominykh@yandex.ru

Pavel A. Fominykh¹, student

¹Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 Vesennyaya str., Kemerovo, 650000, Russia

²ООО «Перспективные технологии», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Шахтерская, 2

²LLC Promising technologies, 2 Shahterskaya str., Kemerovo, 650000, Russia

Аннотация: В статье приводятся общие сведения по механическим передачам. Отмечается, что наиболее широкое применение в машиностроении и приборостроении нашли зубчатые передачи. Дается характеристика зубчатых передач с эвольвентным профилем зуба, разбираются их основные геометрические параметры. Указываются преимущества и недостатки эвольвентных передач, а также основные сферы применения. Рассматривается передача Новикова в качестве примера передачи с круговым профилем зуба. Приводятся два основных вида передачи Новикова, а также дается ее краткая сравнительная характеристика. Разбираются основные способы описания и типы циклоид. Дается характеристика цевочного зацепления как одной из разновидностей циклоидальных передач. Подробно разбираются принципы формирования эксцентриково-циклоидального зацепления. Приводятся результаты промышленных испытаний и математического моделирования, а также дается сравнительная характеристика ЭЦ-зацепления с основными типами передач. Указываются его преимущества и недостатки, а также возможные сферы применения. Разбираются основные свойства и способы построения кривых типа «улитка Паскаля», а также преимущества их применения в зубчатых передачах. Дается характеристика торцевым передачам, в частности, передаче Нечаева и торцевой цевочной передаче. Приводятся сферы применения торцевых передач. В заключении делается вывод о возможности применения собранной в обзоре информации при проектировании передаточных механизмов в горной

технике.

Ключевые слова: зубчатые передачи; эвольвентное зацепление; зацепление Новикова; циклоида; эксцентриково-циклоидальное зацепление; цепочное зацепление; торцевая передача; передача Нечаева, «улитка Паскаля».

Abstract: The article provides general information on mechanical gears. It is noted that gears have found the widest application in mechanical engineering and instrument making. The characteristic of gears with involute tooth profile is given and their main geometrical parameters are analyzed. The advantages and disadvantages of involute gears and the main areas of application are indicated. Novikov gearing is considered, as an example of a transfer with a circular profile of the teeth of the gear. Two main types of Novikov gearing and their brief comparative characteristic is given. The basic description methods and cycloid types are analyzed. The characteristic of the pinching gear as one of the varieties of cycloidal gears is given. The principles of the formation of eccentric-cycloidal gearing are discussed in detail. The results of industrial tests and mathematical modeling are given, and a comparative characteristic of EC gearing with the main types of gears is given. Indicates its advantages and disadvantages, and possible areas of application. The basic properties and methods for constructing curves of the "Pascal snail" type and the advantages of their use in gears are examined. The characteristic of the front-end transmission is given, in particular, the Nechaev's transmission and the front-end pinching gear. Are spheres of application of front-end gears is given. In conclusion, it concludes the possibility of using information from the review in the design of gears in mining equipment.

Keywords: gear trains; involute engagement; Novikov gearing; cycloid; eccentric-cycloidal engagement; pinching gear; front-end transmission; Nechaev's transmission; Pascal's snail.

1 Общие сведения

Механическими передачами называют механизмы, передающие работу двигателя исполнительному органу машины. Передавая механическую энергию, передачи одновременно могут выполнять следующие функции [1]:

- а) понижать и повышать угловые скорости, повышая и понижая соответственно вращающие моменты;
- б) преобразовывать один вид движения в другой;
- в) регулировать угловые скорости рабочего органа машины;
- г) реверсировать движение;
- д) распределять работу двигателя между несколькими исполнительными органами машины.

В зависимости от принципа действия все механические передачи делятся на две группы:

- 1) передачи зацеплением (зубчатые, цепные, червячные);
- 2) передачи трением (фрикционные, ременные);

Во всех отраслях машиностроения и приборостроения наиболее широкое применение нашли зубчатые передачи благодаря ряду их достоинств: постоянству передаточного числа, отсутствию проскальзывания, большой несущей способности при сравнительно малых габаритах и массе, большой долговечности, работе в обширном диапазоне нагрузок, способности передавать энергию между валами, как угодно расположенными в пространстве, сравнительно малым нагрузкам на валы и их опоры, высокому КПД (до 0,995), простоте обслуживания и ухода. К недостаткам зубчатых передач можно отнести высокие требования к точ-

ности изготовления зубчатых колес, сборки передач и необходимость повышенной жесткости корпусов, опор, валов; шум, особенно при больших частотах вращения и недостаточной точности, вибрации, низкую демпфирующую способность [2, 3].

2 Зубчатые передачи с эвольвентным профилем зуба

Эвольвентное зацепление — это зубчатое зацепление, профили зубьев которого в цилиндрических передачах очерчены по эвольвенте окружности, а в конических — сферическими эвольвентами [4].

Эвольвентой называют кривую, которую описывает точка прямой линии, перекатывающейся без скольжения по окружности диаметром d_b , называемой основной. Рассматривая «ниточную модель зацепления», эвольвента может быть определена так же, как и кривая, которую описывает конец вытянутой нити, разматываемой с окружности, поэтому эвольвенту называют разверткой окружности [5]. Она имеет следующие свойства [5]:

- 1) между эвольвентами всегда равное и постоянное расстояние;
- 2) нормаль к эвольвенте является касательной к основной окружности;
- 3) радиус кривизны эвольвенты равен дуге основной окружности, расположенной под этим радиусом.

Эвольвентное зацепление было предложено Л. Эйлером в середине XVIII в., а стало широко применяться только в конце XIX — начале XX вв [6]. На сегодняшний день это зацепление имеет более

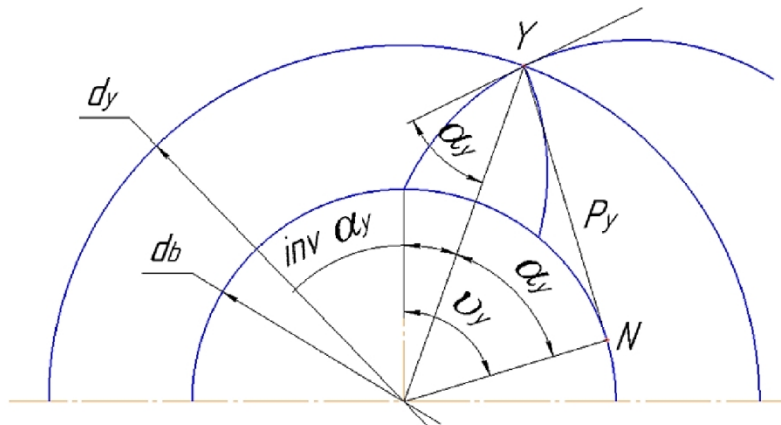


Рис. 1. Параметры эвольвенты [1]
 Fig. The parameters of the involute

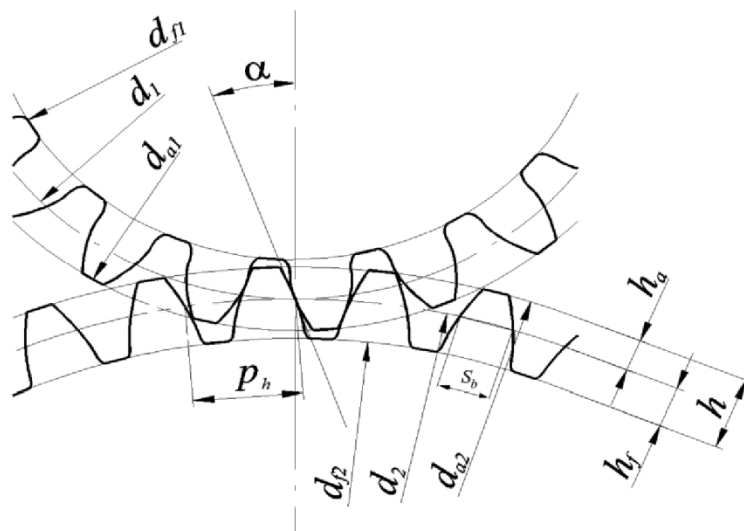


Рис. 2. Параметры эвольвентного зацепления [10, 11]

m – модуль, h_f – высота ножки зуба, h_a – высота головки зуба, $\alpha=20^\circ$ – угол профиля исходного контура, d – делительная окружность, d_a – окружность вершин, d_f – окружность впадин, S_b – толщина зуба, p_h – шаг по основной окружности

Fig. 2. Parameters of involute gearing

m – module, h_f – tooth base height, h_a – tooth head height, $\alpha=20^\circ$ – source contour angle, d – pitch circle, d_a – vertex circle, d_f – troughs circle, S_b – tooth thickness, p_h – main circle step

широкое применение из-за того, что зубья могут быть обработаны инструментом с прямолинейной режущей кромкой, а также нечувствительности к изменению межосевого расстояния [2].

Профиль зуба, представляющий собой развертку основной окружности – эвольвента. Положение произвольной точки Y на эвольвенте можно выразить любым из следующих параметров (рис. 1) [4]:

- углом развернутости ν_Y ;
- эвольвентным углом $\text{inv } \alpha_Y$;
- диаметром окружности, на которой расположена точка Y – d_Y ;
- радиусом кривизны профиля в точке Y – P_Y .

Эвольвентное зацепление применяется во всех отраслях машиностроения, а именно в автомобилестроении, станкостроении, редукторостроении, тракторостроении, краностроении, самолетостроении [7]. Эвольвентные передачи очень часто применяются в редукторах с цилиндрическими колесами.

Эвольвентные передачи в определенных пределах допускают изменение межосевого расстояния, сохраняя при этом постоянство передаточного отношения [8]. В таких передачах передаточное отношение колеблется от 0 до 6, т.к. при $i \geq 6$ увеличиваются габариты передачи, в результате в месте контакта зубьев возникают большие контактные напряжения [9].

Основные геометрические параметры эволь-

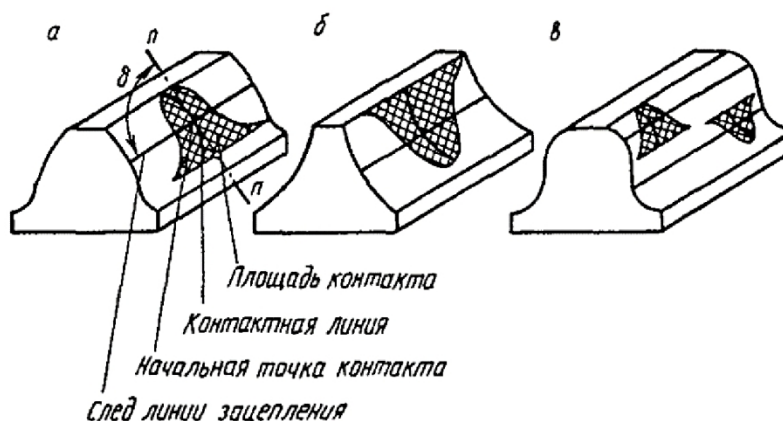


Рис. 3. Профили зубьев колес [3]

а) за полюсной передачи, б) дополюсной передачи, в) дозаполюсной передачи

Fig. 3. Wheel teeth profiles [3]

а) postpolar gear, б) subpolar gear, в) sub-postpolar gear



Рис. 4. Виды профилей шестеренок и зубчатых колес с зацеплением Новикова [8]

Fig. 4. Types of profiles of gears with Novikov gearing [8]

вентного зацепления представлены на рис. 2.

Преимущества:

- технологическая простота изготовления и контроля [12];
- простота формы зуборезного инструмента [13];
- передаточное отношение остается постоянным при изменении межцентрового расстояния колес вследствие погрешностей монтажа [13];
- нечувствительность (в определенных пределах) к технологическим погрешностям в радиальном направлении по сравнению с зацеплением Новикова [12];
- высокий КПД в сравнении с передачей Нечаева [9];
- надежность и долговечность работы [12];

Недостатки:

- в несколько раз меньше нагрузочная способность по сравнению с зацеплением Новикова [12] и с передачей Нечаева [14];
- чрезвычайно чувствительно к технологическим погрешностям углового вида (перекосы и параллельность осей колес зубчатой пары, погрешности направления зуба и т. д.) [12];
- малое передаточное отношение по сравнению с передачей Нечаева [6];
- модуль в 2-2,5 раза меньше при одинаковых размерах, что в 3-4 раза снижает изгибные напряжения по сравнению с передачей Нечаева

[14];

- габаритные размеры и масса в 1,5 – 2,5 раза больше, чем у передачи Нечаева [14].

3 Зубчатые передачи с круговым профилем зуба (передачи Новикова)

Зацепление Новикова (крюковинтовое зацепление, передача Новикова) — механическая передача, альтернативная эвольвентному типу зацепления, предложенная советским инженером М. Л. Новиковым в 1954 году.

Нестандартность предложения Новикова заключалась в том, чтобы от линейного касания зубьев перейти к поверхностному. Кривизны торцевых профилей зубьев колес Новикова не подчиняются соотношению Эйлера-Савари, что позволяет их проектировать как выпуклый и вогнутый профили с малой разностью кривизны [8].

Зубья колес в торцевом сечении очерчены окружностями ближайших радиусов. Площадка контакта зубьев перемещается не по профилю зуба, как в прямоугольном эвольвентном зацеплении, а вдоль него. Угол давления и скорость перемещения не изменяется.

Различают два вида зацеплений Новикова:

- с одной линией зацепления (ОЛЗ) за полюсные или дополюсные (рис. 3, а, б);
- с двумя линиями зацепления (ДЛЗ) доза-

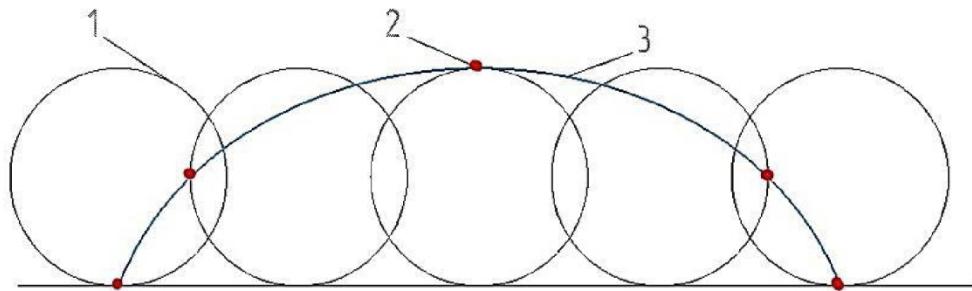


Рис. 5. Циклоида.

1 – производящий круг; 2 – точка; 3 – циклоида

Fig. 5. Cycloid.

1 – generating circle; 2 – point; 3 – cycloid

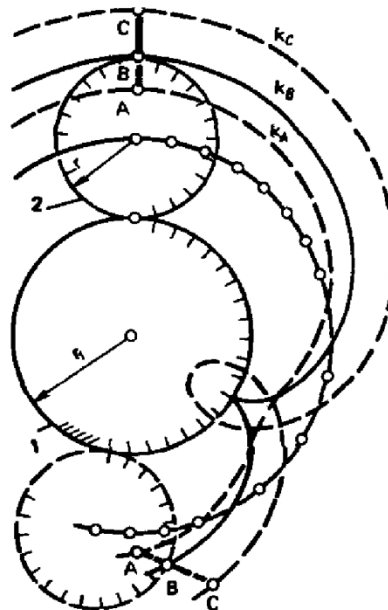


Рис. 6. Эпициклоида [6]

1 – направляющая окружность; 2 – производящая окружность;

A, B, C – точки, жестко связанные с производящей окружностью; k_a – укороченная эпициклоида; k_b – обыкновенная эпициклоида; k_c – удлиненная эпициклоида

Fig. 6. Epicycloid [6]

1 – guide circle; 2 – generating circle;

A, B, C – points, rigidly connected with the generating circle; k_a – shortened epicycloid; k_b – common epicycloid; k_c – elongated epicycloid

полусные (рис. 3, в).

Подход замены линейного контакта поверхности зуба точечным позволил изменить вид профилей зубьев, наблюдаемый в торцевом сечении: вместо взаимооггибаемых кривых используются зубья, очерченные окружностями радиусов, имеющими минимальную разность кривизны. При этом один из профилей обычно выполняют выпуклым, а второй – вогнутым. Однако в отдельных случаях зубья шестерни и колеса могут иметь и иной профиль, как показано на рисунке 4.

Для зацепления Новикова характерно то, что оно обладает нулевым торцовым коэффициентом перекрытия, по этой причине его работоспособность может обеспечить только косое или шевронное исполнение зубьев.

Согласно [15], использование передач Новикова ДЛЗ с исходным контуром по ГОСТ 15023-76 вместо эвольвентных улучшенных колес увеличивает износостойкость и долговечность работы зубчатых передач, но только в тех случаях, когда передачи Новикова заменяются эквивалентными по параметрам и материалу эвольвентными колесами, которые не подвергались термической или химико-термической обработке и имеют твердость зубьев 190-300 ед. Бриннеля.

Используется зацепление в механизмах с высокими нагрузками и при стесненных габаритах передачи. Первоначально зацепление предназначалось для военно-промышленного комплекса: авиационные двигатели, тяжеловесные агрегаты (танки, тягачи, трактора и т.д.), однако после со-

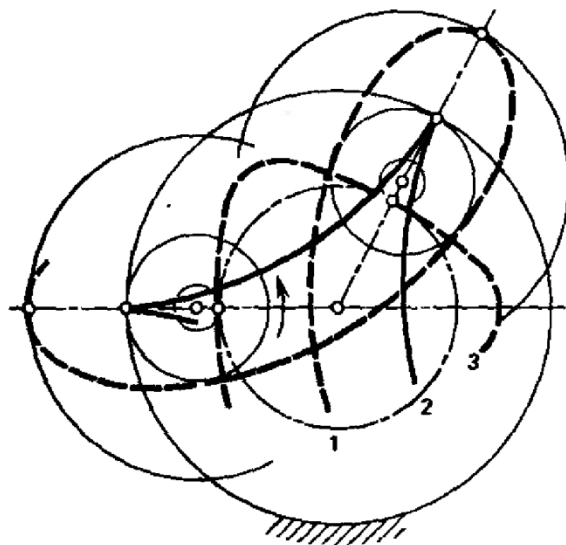


Рис. 7. Гипоциклоида [6]

1 – удлиненная гипоциклоида; 2 – обыкновенная гипоциклоида; 3 – укороченная гипоциклоида

Fig. 7. Hypocycloid [6]

вершенствования зацепления оно стало применяться и в других сферах: угледобывающих (редуктора, трансмиссии добывающих машин), нефтедобывающих (станки-качалки и др. оборудование), в тяговых передачах тяжелых машин (троллейбусов, автобусов, трамваев, вертолетов, танков и т.д.), в крановых редукторах подъема и передвижения.

Преимущества (по сравнению с эвольвентным зацеплением):

- более высокая нагрузочная способность по контактным напряжениям в 1,5 - 2 раза (при твердости поверхности зубьев до 350 HB) [16];
- малый уровень шума [3];
- Более высокие передаточные числа (из-за разницы габаритов в 20-25%) [3, 18];
- передача менее чувствительна к перекосам зубчатых колес вследствие точечного контакта зубьев [16];
- более высокая стабильность величины нагрузок, ломающих зубья [15].

Недостатки:

- заметная чувствительность и зависимость от изменения межосевого расстояния [3];
- при возрастании нагрузки отмечается существенное увеличение осевой составляющей, что приводит к усложнению конструкции узлов опорных подшипников [18];
- при изготовлении передачи с одной линией зацепления необходимо наличие двух специальных фрез (одна для нарезки зубьев колеса, а вторая - шестерни) [3];
- Меньшая прочность зуба на изгиб по сравнению с эвольвентными [19].

4 Зубчатые передачи с циклоидальным профилем зуба

Траектория точки производящей окружности, катящейся по некоторой прямой без скольжения, называется циклоидой (см. рис. 5). Циклоида бывает трех видов [20, 21, 22] (см. рис. 6-7):

1) укороченная – точка, описывающая циклоиду, находится внутри производящего контура;

2) удлиненная – точка, описывающая циклоиду, находится снаружи производящего контура;

3) обыкновенная – точка находится на самой производящей контуре (см. рис. 5).

Циклоиду можно описать как графически, так и аналитически. Для того, чтобы описать циклоиду аналитически, используют параметрическое уравнение:

$$x = r(t - \sin t) \quad ;$$

$$y = (\pm)r(1 - \cos t) ,$$

где r — радиус производящей окружности, катящейся без скольжения по прямой вдоль оси X и Y ; t — параметр, меняющийся для арки циклоиды в пределах $0 \leq t \leq 2\pi$ [23].

С помощью параметрического уравнения можно найти координату точки, расположенной на производящей окружности. С каждым поворотом производящей окружности точка меняет положение в пространстве, тем самым формируя циклоиду. При наличии известных параметров направляющего и производящего контуров циклоиду можно построить при определении закономерностей, которым подчиняется движущаяся точка.

Циклоидальные кривые (циклоида, эпициклоида, гипоциклоида, трохоида, астроида) применяются в технике для построения профилей: зубьев, шестерен, очертания многих типов эксцентриков, кулаков, а также деталей машин, которые совершают одновременно равномерное вращательное и поступательное движения [20, 22, 23, 24].

Циклоидальное зацепление – вид зацепления, при котором профили зубьев очерчены по участкам циклоид: эпициклоид и гипоциклоид.

Эпициклоида (см. рис. 6) – это кривая (k_A , k_B , k_C), описывающая точку (A , B , C), жестко связанную с окружностью 2 радиусом r , которая катится с внешней стороны направляющей окружности 1 радиусом r_1 [5].

Гипоциклоида – это кривая, описывающая точку, жестко связанную с производящей окружностью, которая катится без скольжения внутри направляющей окружности (см. рис. 7) [6].

При профилировании зубьев используют только укороченные циклоиды, поскольку для

обыкновенных и удлинённых циклоид свойственны самопересечения и заострения контуров [25]. При внешнем зацеплении головку зуба очерчивает эпициклоида, а ножку зуба – гипоциклоида. При внутреннем зацеплении – наоборот.

Преимущества циклоидального зацепления:

- меньше скорость скольжения профилей и отсутствие переходных участков, а значит, более плавная и бесшумная работа [24, 25];
- более высокий КПД (около 95%) [24];
- коэффициент перекрытия больше 2 [24, 25];
- отсутствие подрезания ножки зуба [24];
- широкий диапазон регулирования геометрических параметров [25];
- возможность получения профиля с любым числом зубьев (в отличие от эвольвентного) [24];
- сохраняет высокий КПД даже при менее точном изготовлении [25].

Согласно данным, приведенным в работе [24], самым существенным недостатком циклоидального зацепления является сложность изготовления инструмента и, как следствие, его высокая цена, поскольку профилем циклоидальной рейки являются две циклоиды, а не прямая, как в эвольвентном зацеплении.

Циклоидальное зацепление широко применяется в нефтегазовой отрасли, в таких механизмах, как [25-26]:

- рабочие органы (РО) роторных гидромашин, компрессоров и ДВС;
- колеса зубчатых передач;
- профили наклонно-направленных скважин (в качестве энергосберегающих профилей с минимальными усилиями при подъеме буровой колонны или сопряженных кривых многоинтервальных профилей без разрыва кривизны траектории).

4.1 Цевочное зацепление

Одной из разновидностей циклоидального зацепления является цевочное зацепление. В этом зацеплении зубья одного колеса заменены цевками – цилиндрами, вставленными между дисками, закрепленными на оси [24].

Цевки одновременно находятся в касании с профилями зубьев другого колеса. Таким образом, центры всех цевек находятся на соответствующих ветвях удлинённых эпициклоид или гипоциклоид. Хотя в одновременном зацеплении могут находиться все цевки, нагрузка может передаваться максимально лишь половиной их общего числа [27].

Преимущества цевочного зацепления:

- плавность хода и низкий уровень шума по сравнению с эвольвентным зацеплением [28];
- высокий ресурс и надежность за счет того, что нагрузка на цевку распределена по всей ее поверхности [28];
- меньшие габариты при одинаковом пере-

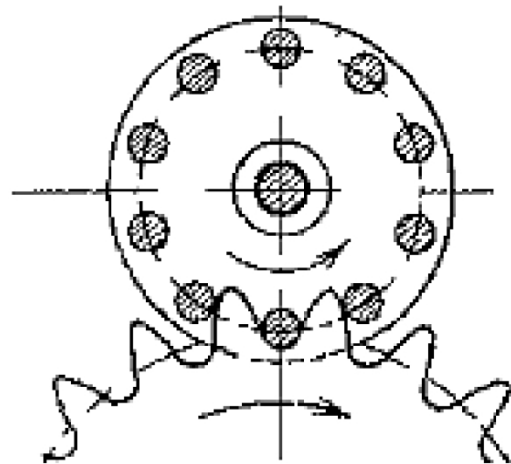


Рис. 8. Цевочное зацепление [27]

Fig. 8. Pinching gear [27]

даваемом крутящем моменте в сравнении с эвольвентным зацеплением [29];

- передаточное отношение от 6 до 190 [30];
- высокая кинематическая точность [31].

Недостатки цевочного зацепления:

- чувствительность к изменению межосевого расстояния [27];
- высокая стоимость [31];
- высокие требования к точности изготовления (при изменении положения цевки на диске меняется и производительность передачи) [31];
- сложность формы зуба исходного контура зуборезного инструмента при методе обката [27].

Основные сферы применения цевочного зацепления: в часовых механизмах, в механизмах наводки орудийных башен, в подъемно-транспортных механизмах и в некоторых типах планетарных редукторов, гусеничных движителях [29].

4.2 Эксцентриковое-циклоидальное зацепление

Зацепление, профили зубьев шестерни которого в торцевых сечениях очерчены дугами эксцентрично смещенных окружностей, а зубья большего колеса в тех же сечениях очерчены участками циклоидальных кривых, называется эксцентриково-циклоидальное (ЭЦ) [32]. Данный вид зацепления был разработан в 2007 году в компании ЗАО «Технология Маркет» (г. Томск) [33]. Однако в работе [32] утверждается, что ЭЦ-зацепление не является новым видом зацепления, а является технологическим вариантом эпициклоидально-цевочного зацепления, в котором цевка заменена зубьями, профили которых в торцевых сечениях очерчены дугами эксцентрично смещенных окружностей. Также в работе [32] отмечается, что расчет геометрии ЭЦ-зацепления совпадает с расчетом геометрических параметров циклоид-

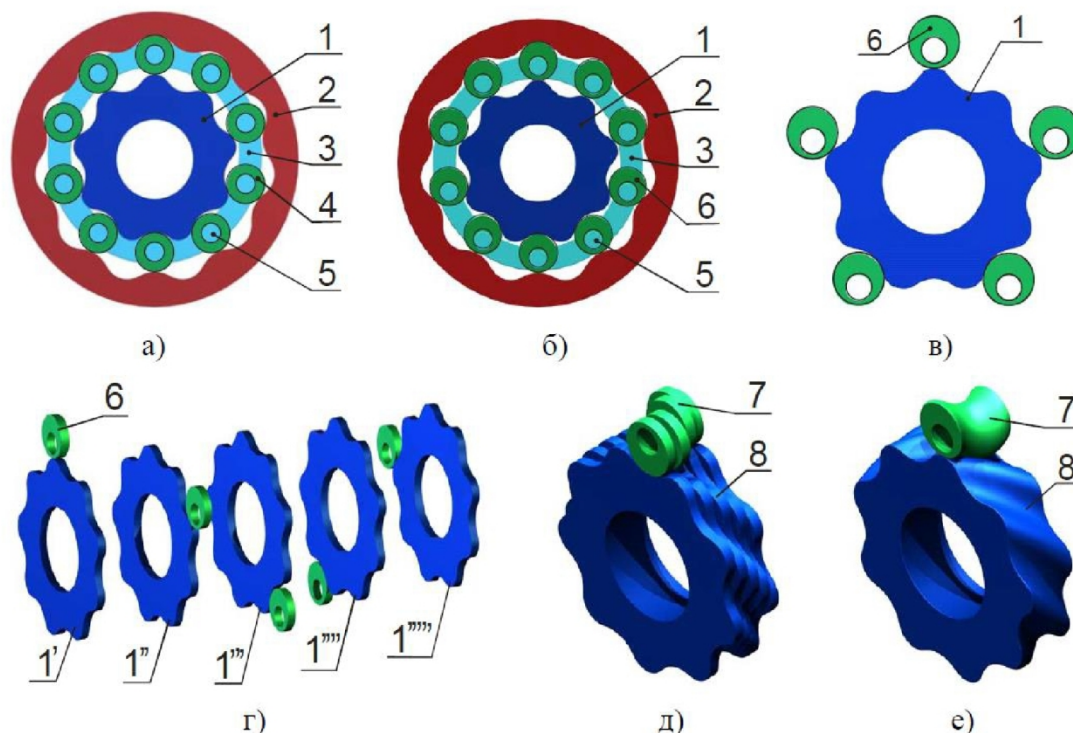


Рис. 9. Принцип ЭЦ-зацепления [34]

1 – ведомое колесо внешнего зацепления, 2 – опорное колесо внутреннего зацепления, 3 – обойма, сидящая на ведущем валу с эксцентриком, 4 – ролики, 5 – пальцы, 6 – эксцентрики, 1, 1', 1'', 1''', 1'''' – сечения ведомого колеса, 7 – шестерня, 8 – зубчатое колесо;

а) редуктор Брарена, б) и в) модификация редуктора Брарена с эксцентриковыми роликами, г) колеса, полученные сечением ведомого колеса редуктора Брарена, д) ЭЦ-зацепление составных колес, е) криволинейное ЭЦ-зацепление

Fig. 9. The principle of EC-gearing [34]

1 – driven wheel with external engagement, 2 – support wheel internal gearing, 3 – the holder, sitting on the drive shaft with an eccentric, 4 – rollers, 5 – pins, 6 – eccentrics, 1, 1', 1'', 1''', 1'''' – the cuts of the driven wheel, 7, 8 – gears;

а) Braren's gearbox, б) and в) Braren's gearbox modification with eccentric rollers, г) wheels obtained by the cross section of the driven wheel Braren's gearbox, д) EC-gears composite wheels, е) curvilinear EC engagement

дально-цевочного зацепления. На эти замечания можно возразить тем, что циклоидально-цевочная передача – это соосная передача с многопарным зацеплением, в то время как ЭЦ-зацепление – это пространственная передача с параллельными или пересекающимися осями. Следовательно, мы имеем дело с двумя принципиально разными передачами.

На рис. 9 изображен принцип формирования ЭЦ-зацепления. Если доработать схему редуктора, предложенного Л. Брареном в 1928 г. (применяется в передачах CYCLO), таким образом, чтобы все его основные звенья (колеса 1, 2 и обойма 3) были выполнены соосно, а ролики 4 заменены на эксцентрики 6 (рис. 9, б, в), а затем мысленно рассечь ведомое колесо 1, то получится ряд колес 1, 1', 1'', 1''', 1'''' и 1''''', с каждым из которых зацепляется эксцентриковый ролик 6, находящийся в разных фазах зацепления с полученными колесами (рис. 9, г). Если повернуть все колеса вместе с эксцентриками, находящимися с ним в зацеплении, до

совмещения осей эксцентриков, то получим эксцентриково-циклоидальное зацепление составных колес (рис. 9, д), в котором шестерня имеет один зуб и составлена из эксцентрично смещенных окружностей, а профиль зуба зубчатого колеса сопрягается с ними в каждом своем торцевом сечении. Винтовые криволинейные поверхности колес 7 и 8 образуются путем последовательных и непрерывных смещения и поворота вокруг собственных осей исходных контуров (рис. 9, в) и имеют противоположные направления вращения [34].

Сравнительный анализ с известными видами зацеплений (эвольвентное, зацепление Новикова и др.), проведенный в работе [35], показал, что ЭЦ-зацепление обладает комплексом преимуществ по ряду характеристик (КПД, передаточное отношение, крутящий момент, надежность, удельные массогабаритные показатели, себестоимость изготовления и др.). В таблице 1 приведено сравнение основных расчетных характеристик одноступен-

Таблица 1. Сравнение основных характеристик одноступенчатых редукторов с разными типами зацеплений [34].

Table 1. Comparison of the main characteristics of single-stage gearboxes with different types of gearing [34].

Тип зацепления	Передачное отношение	КПД	Относительная масса ¹ , кг/Н·м
Эвольвентное(внешнее)	1 – 8	0,93 – 0,97	0,04 – 0,07
ЭЦ (внешнее)	4 – 50	0,93 – 0,97	0,005 – 0,01
С промежуточными телами качения	10 – 50	0,4 – 0,8	0,01 – 0,02
Червячное, глобоидное	10 – 80	0,4 – 0,8	0,06 – 0,24

чатых редукторов с ЭЦ-зацеплением и другими наиболее распространенными типами зацеплений.

На базе лаборатории компании ЗАО «Технология Маркет» был проведен ряд сравнительных испытаний редукторов с эвольвентным и ЭЦ-зацеплением для определения предельного момента, вызывающего разрушение. Максимальный момент составил у эвольвентного редуктора 96 Н·м, а у редуктора с ЭЦ-зацеплением 120 Н·м [41], т.е. больше на 25%. Также в ходе данных испытаний было установлено, что КПД редуктора с ЭЦ-зацеплением на 2% выше, чем КПД редуктора с эвольвентным зацеплением, а температура масла на 4,5 градуса ниже [41]. В 2017 г. на АО «Тяжмаш» были изготовлены и испытаны 3 редуктора. По результатам этих испытаний были выявлены следующие положительные особенности: низкие уровни шума и вибрации, низкая температура нагрева при длительной работе, высокая устойчивость к износу ножки зуба и удельная передаваемая мощность, а также возможность получения требуемого качества поверхности зубьев без использования шлифовального инструмента.

Также было установлено, что при замене в редукторах станков-качалок колес с косозубым зацеплением на колеса с ЭЦ-зацеплением с использованием того же корпуса и тех же посадочных мест и с сохранением передаточного отношения при тех же габаритах передачи требуется значительно меньшее число зубьев и появляется возможность значительно увеличить размер зубьев, что в целом позволяет увеличить ресурс редуктора до 5 раз [34], а согласно результатам математического моделирования, приведенного в работе [33], КПД в редукторах с ЭЦ-зацеплениями достигает почти 100% при условии, если момент трения превосходит передаваемый момент.

Достоинства ЭЦ-зацепления:

- высокий КПД (до 99%) [35];
- высокая несущая способность [36];
- низкий уровень шума [36];
- обеспечивает широкий диапазон передаточных отношений (за счет возможности уменьшения количества зубьев ведущего колеса до 1), при минимальной величине относительной массы (см. табл. 1) [34].

- менее требовательно к перекосам по срав-

нению с эвольвентным зацеплением и менее требовательно к межцентровому зазору по сравнению с зацеплением Новикова [38].

Преимущества ЭЦ-зацепления перед эвольвентным зацеплением:

- изгибная жесткость зубьев выше, поэтому предполагаемые значения коэффициента удельной жесткости зубьев выше ориентировочно на 20 % [36];
- номинальная удельная нагрузка выше, поскольку суммарная длина контактных линий пропорциональна коэффициенту торцевого перекрытия [32];
- максимальный передаваемый крутящий момент больше до 7 раз [33];
- себестоимости изготовления ниже в 1,5-2 раза, за счет меньших металло- и энергоемкости [39];
- более низкая виброактивность [39];
- меньшие габариты при нагрузочной способности, либо повышенная нагрузочная способность при одинаковых габаритах (см. рис. 9) [39];
- максимальный передаваемый момент больше на 25% [36];
- температура масла в редуктор ниже на 4,5 градуса при максимальном передаваемом моменте [36].

Недостатки ЭЦ-зацепления:

- увеличение межосевого расстояния вследствие деформации опор и валов, а также погрешностей изготовления корпуса – увеличивает концентрации удельной нагрузки и контактных напряжений в околополюсной зоне [32].
- проскальзывание между эксцентриком и циклоидальным [37];
- существует возможность подобрать передачу с эвольвентным зацеплением, имеющую большую нагрузочную способность [32].

В настоящее время с ЭЦ-зацеплением изготовлен целый ряд различных передаточных механизмов, например, ручные гайковерты, редуктор привода перемещения козлового крана, линейный ЭЦ-редуктор для клапана первого контура АЭС «БРЕСТ-300», тяговый редуктор подземного электровазона К-25, открытые редукторы градиен, усилитель крутящего момента УКМ1700, вертолетный редуктор [40], редуктор привода вращения

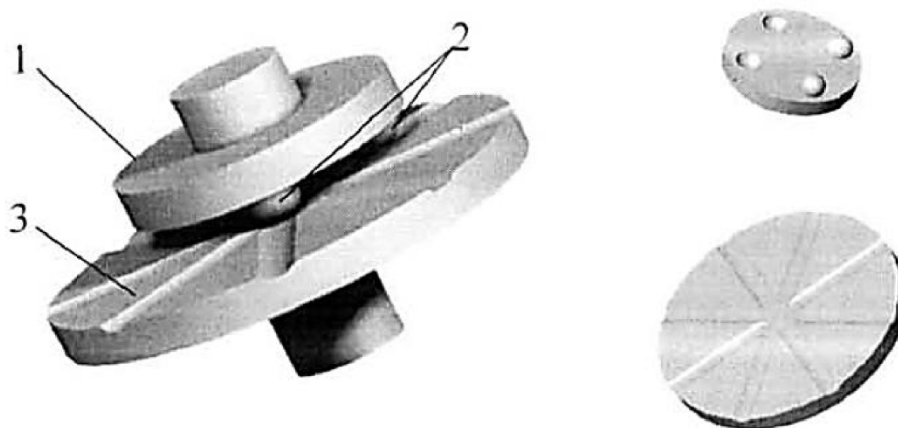


Рис. 10. Торцевая передача с шариковыми промежуточными телами [8]

1 – шайба ведущего вала, 2 – шариковые промежуточные тела, 3 – шайба ведомого вала

Fig. 10. Front-end transmission with ball intermediate bodies [8]

1 – drive shaft washer, 2 – ball intermediate bodies, 3 – driven shaft washer

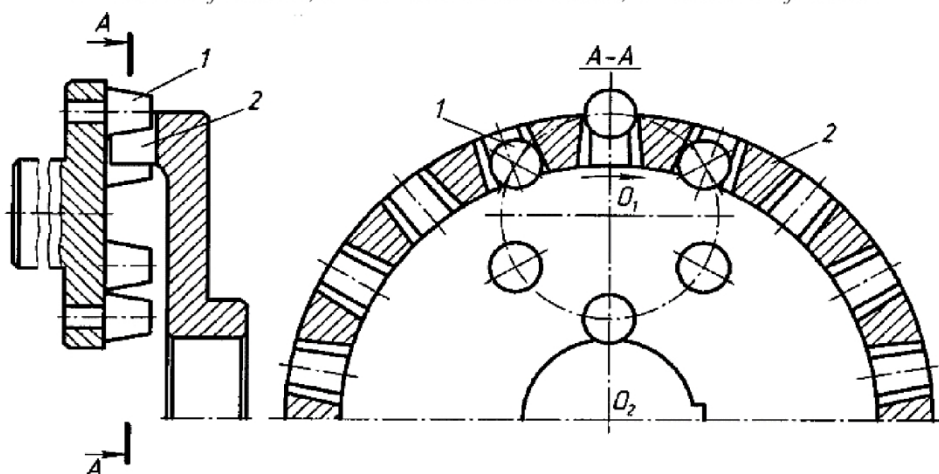


Рис. 11. Торцевая передача Нечаева [45]

1 – шестерня, 2 – зубчатое колесо

Fig. 11. Front-end Nechaev's transmission [45]

1, 2 – gears

антенны, редукторы карьерных экскаваторов и т.д., с 2011 г. в эксплуатации находится осевой тяговый редуктор железнодорожного локомотива МПТ-6 [36]. Также ЭЦ-зацепление хорошо зарекомендовало себя за рубежом. Например, на его основе в США изготавливаются редуктора для измельчителя бытовых отходов и пластмассовые шестерни для пищевой промышленности. Общепромышленные редукторы с ЭЦ-зацеплением успешно прошли испытания в компании «SEW-Eurodrive» (Германия), а главная передача карьерного самосвала БелАЗ-7555 находится на испытаниях на предприятии-изготовителе (Беларусь). Таким образом, можно утверждать, что ЭЦ-зацепление может эффективно использоваться в любых редукторах общепромышленного применения [36]. В работах [41-44] авторы обосновывают перспективность применения ЭЦ-зацепления в

трансмиссии геохода нового поколения.

5 Торцевые передачи

Торцевые передачи известны с 1961 г. и бывают двух основных видов [8]:

1. С промежуточными телами (шариковыми (рис. 10) или роликовыми) – содержит набор зацепляющихся тел качения, связанных с ведущим и ведомым валом посредством шайб. Однако такие передачи сложны в изготовлении и требуют обязательного наличия смазки, что ограничивает их применение в открытых передачах [8].

2. Представляет собой два зубчатых колеса, сцепленные между собой торцевыми зубьями (рис. 11). Зубья первого колеса имеют профиль, ограниченный плоскостью, а зубья второго колеса – круговой профиль, то есть форма зуба состоит

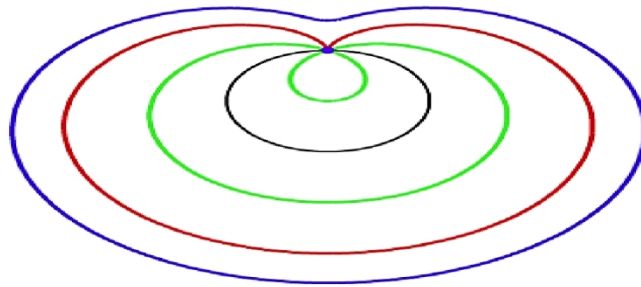


Рис. 12. «Улитка Паскаля» [54]
Fig. 12. «Pascal's snail» [54]

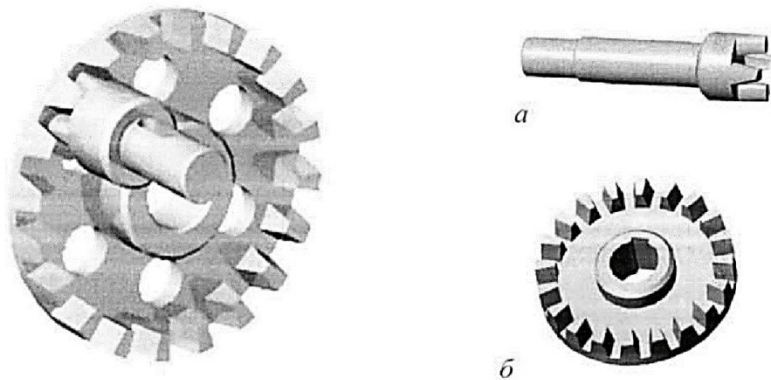


Рис. 13. Зубчатая передача с внутренним зацеплением торцевых зубьев и параллельными осями вращения колес [8]

а) ведущая шестерня, б) ведомое колесо

Fig. 13. Gear transmission with internal gearing of the front teeth and parallel axes of rotation of the wheels [8]

а) drive gear, б) drive gear

из усеченного конуса, цилиндра или бочкообразного тела [45].

Передача движения происходит по поверхностям зубьев шестерни 1 и колеса 2. Такое зацепление обеспечивает возможность равномерного распределения износа рабочих поверхностей в непрерывном процессе работы передачи (без остановок на регламентное обслуживание). Особенностью данной передачи является то, что конструкционная посадка для размещения ножки зуба первого колеса в гнезде ее венца назначается такая, что момент трения скольжения в кинематической паре «зуб шестерни – зуб колеса» незначительно (до 5 %) превосходит противоположный ему момент трения покоя в кинематической паре «ножка зуба первого колеса – гнездо в ее венце». В этом случае при работе передачи обеспечено качение без скольжения в относительном движении двух колес, при котором выполняется условие равномерного распределения интенсивности износа их рабочих поверхностей. Для снижения коэффициента трения в кинематической паре «ножка зуба первого колеса – гнездо в ее венце» между боковой (рабочей) поверхностью ножки зуба и поверхностью гнезда размещается промежуточный слой металла, например, свинца, собственная пластичность которого превосходит пластичность материала зуба

шестерни и ее венца. Создание этого слоя, выполняющего роль твердой «смазки», на боковой поверхности ножки зуба выполняется, например, путем плазменного напыления или гальванопокрытием [46].

Достоинства:

- простота [47] и меньшая стоимость [46] изготовления по сравнению эвольвентной передачей;
- для нарезания зубьев шестерни и колеса используется один инструмент [8];
- высокая изгибная и контактная прочность по сравнению с эвольвентной передачей [46; 47];
- высокое передаточное отношение в одной ступени по сравнению с эвольвентной передачей [46];
- высокая степень ремонтопригодности и взаимозаменяемости [46];
- торцевое расположение зубьев позволяет создавать более компактные приводы [8];
- при одинаковых габаритах размер зубьев может быть увеличен в 2-2,5 раза по сравнению с эвольвентным зацеплением, что снижает изгибные напряжения [47].

Недостатки:

- высокая точность при монтаже для сохранения линейного контакта профилей по сравне-

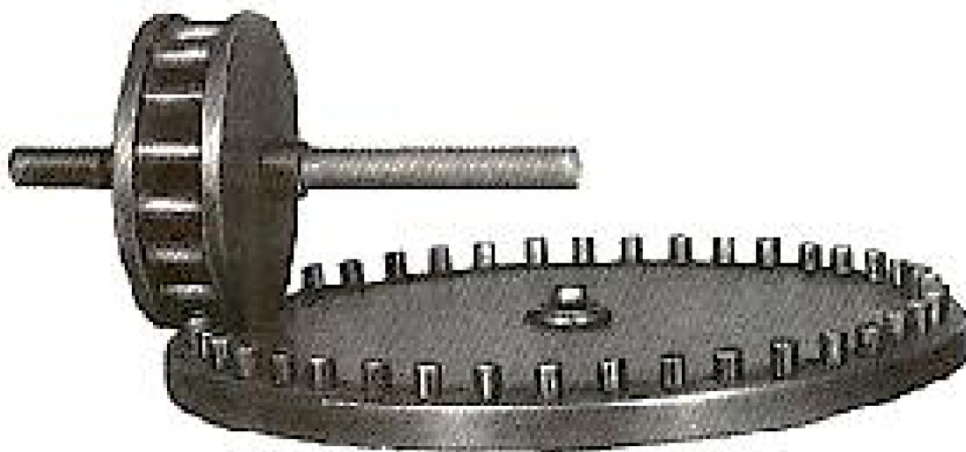


Рис.14. Торцевое цевочное зацепление [49]
Fig.14. Front-end pinching engagement [49]

нию с передачей Новикова, однако примерно такая же, как и для эвольвентного зацепления [47];

- большая скорость скольжения профилей по сравнению с эвольвентным зацеплением [46];
- меньший коэффициент перекрытия (меньшая плавность работы) [46];
- больший износ профилей по сравнению с эвольвентной передачей [46].

На сегодняшний день наиболее распространены следующие виды торцевых передач: передача Нечаева и цевочное зацепление.

5.1 Передача Нечаева

Передача, разработанная Нечаевым А.И. в 1975 году [52], представляет собой два зубчатых колеса, сцепленные между собой торцевыми зубьями (рис. 11). Данная зубчатая передача способна работать в таких условиях, в которых работа эвольвентных передач невозможна [8]. Зубья ведомого зубчатого колеса выполнены с плоскими рабочими поверхностями, а ведущей шестерни – с выпуклыми рабочими поверхностями, ограниченные кривыми семейства «улиток Паскаля».

«Улитки Паскаля» – это плоская алгебраическая кривая 4-го порядка [54] (рис. 12), которая описывается уравнением:

$$(x^2+y^2+ay)^2=l^2(x^2+y^2),$$

где a — диаметр исходной окружности, l — расстояние, на которое смещается точка вдоль радиус-вектора [54].

Благодаря особой форме данной кривой, коэффициент перекрытия в таком зацеплении увеличен до двух, что придает высокую плавность и малую шумность. Зацепление зубьев подтверждается теоремой Эйлера-Савари [52, 53], которая гласит: прямые, соединяющие центры кривизны центроид и соответственные центры кривизны сопряженных профилей, должны пересекаться в одной точке с линией, проведенной через точку

касания центроид перпендикулярно профильной нормали [55].

Принцип работы передачи состоит в следующем: при вращении ведущего колеса (рис. 13, а) его зуб входит в зацепление с зубом ведомого колеса (рис. 13, б) и передает ему вращательное движение. Взаимное обкатывание профилей зубьев происходит по всей высоте с постоянным передаточным отношением, что снижает вероятность кромочных ударов при пересопряжении зубьев. В результате достигается высокая плавность работы [52, 53].

Достоинства:

- повышенная нагрузочная способность по сравнению с эвольвентными зацеплениями в 1,6 раз [56];
- контактные напряжения больше на 20-25% [56], а согласно [8] – в 1,5-2 раза по сравнению с эвольвентными зацеплениями;
- модуль в 2-2,5 раза больше при одинаковых размерах, что в 3-4 раза снижает изгибные напряжения по сравнению с эвольвентным зацеплением [56];
- возможность образования передачи без подрезания и заострения с достаточной плавностью зацепления [57];
- габаритные размеры и масса в 1,5-2,5 раза меньше, чем у эвольвентных передач [56].
- при уменьшении габаритов и металлоемкости передачи Нечаева происходит увеличение передаточного отношения по сравнению с эвольвентными передачами [58];
- т. к. линия зацепления передачи Нечаева имеет форму участка внешней петли «улитки Паскаля», обеспечивается высокий коэффициент перекрытия [58].

Недостатки:

- сложное профилирование малых зубчатых колес(шестерен) по сравнению с эвольвентными колесами [56];

- индивидуальное изготовление шестерни, то есть изготовление новых инструментов и оснасток [56];
- затрудненное восстановление изношенных рабочих поверхностей [8] и низкий уровень ремонтнопригодности [58];
- невысокое КПД передачи (0,94-0,96) [56];

5.2 Торцевое цевочное зацепление

Зацепление, где профиль зубьев одного из колес является круговым, называется цевочным (рис. 14). Круговой профиль позволяет изготовить каждый зуб без особых трудностей, например, на токарном станке. Профиль поверхности сопряжения должен отвечать требованиям основной теории зацепления, реализацию которых можно обеспечить методом обкатки, который является самым распространенным способом изготовления зубчатых колес.

В передаче Нечаева осуществляется контакт выпуклой поверхности с плоскостью, а в торцевой передаче с цевочным зацеплением круговая поверхность зубьев первого колеса контактирует с вогнутой поверхностью второго колеса, что уменьшает контактные напряжения.

Если зубья первого колеса изготовлены в виде ролика с полным круговым профилем, можно закрепить его на оси с возможностью вращения и получить цевочную торцевую передачу. Такое решение имеет преимущество перед обычными цевочными передачами, например, меньшие габариты [48].

5.3 Применения торцевых передач

Наиболее широко торцевые передачи используются в ротационных механизмах [45]. В тоже время передача Нечаева нашла свое применение в устройствах для измельчения материалов, например, в дезинтеграторах, поскольку данная передача высокоэффективна, особенно при решении экологических проблем и проблем, связанных с восполнением сырьевых ресурсов [57]. В работе [58] подтверждается перспективность использования передачи Нечаева в тяговом приводе локомотива, в т. ч. за счет повышения надежности тягового привода, его технологичности при изготовлении и обслуживании, а также уменьшения его габаритов.

6 Заключение

Материал, представленный в данной публикации, может быть использован при проектировании редукторов, трансмиссий и других передаточных механизмов горной техники в качестве основного либо дополнительного источника справочной информации. Краткость и наглядность изложенного материала, а также подробный обзор преимуществ и недостатков позволяют обосновать выбор типа зубчатой передачи для решения конкретной научной и инженерной задачи на стадии проектировочных расчетов, а источники, приведенные в списке литературы, предоставляют информацию для проведения более глубокого анализа в этой области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ку克林, Н.Г. Детали машин / Н.Г. Ку克林, Г.С. Кушлина. – Москва: Высшая школа, 1987. – 383 с.
2. Г.Б. Иосилевич. Детали машин [Текст] / Г.Б. Иосилевич. – Москва: «Машиностроение», 1988. – 368с.
3. Скобейда, А. Т. Детали машин и основы конструирования / Скобейда А. Т., Кузьмин А. В., Макейчик Н. Н., Под ред. Скобейды А. Т. - Минск: Высшейшая школа, 2006.
4. И. А. Болотовский. Справочник по геометрическому расчету эвольвентных зубчатых и червячных передач [Текст] / И. А. Болотовский, В. И. Безруков, О. Ф. Васильева, Б. И. Гурьев, М. Л. Ерихов, А. Б. Ефименко, В. П. Котельников, Б. А. Курлов, Л. Л. Русак, В. Э. Смирнов, Б. И. Шендерей. – Москва: «Машиностроение», 1986 – 448 с.
5. Ермак В. Н. Теория машин и механизмов (краткий курс) [Текст] / В. Н. Ермак, Н. П. Курышкин. – Кемерово: КузГТУ, 2011. – 194с.
6. А. Ф. Крайнев. Словарь-справочник по механизмам [Текст] / А. Ф. Крайнев. – Москва: Машиностроение, 1987. – 560с.
7. Пат. 2151933 Российская Федерация, МПК51 F16H 1/06, B23F 5/14, B23F 5/22. Эвольвентное зацепление [Текст] / Кочетков А.Ф.; заявитель и патентообладатель Ульяновский государственный технический университет. – № 98103606/02; заявл. 18.12.00; опубл. 27.06.2000, Бюл. № 18. – 5с.
8. Груздев Д. Е. Разработка методики геометрического и прочностного расчетов торцевых передач с зацеплением по "Улиткам Паскаля" [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02: защищена: утв. / Груздев Дмитрий Евгеньевич. – Красноярск, 2004. – 110с.
9. Тупицын А. А. Торцевая зубчатая передача с внутренним цевочным зацеплением [Текст] / Тупицын А. А., Нечаев В. В., Гозбенко В. Е. // Современные технологии. Математика. Механика и машиностроение. – 2014. – №3. – С. 25-29

10. ГОСТ 16530-83. Передачи зубчатые. Общие термины, определения и обозначения [Текст]. — Взамен ГОСТ 16530-70; введ. 1984-01-01. — Москва: Изд-во стандартов, 2004. — 50с.
11. Бабкин А.И. Детали машин и Основы конструирования 6 семестр [Текст] / Бабкин А.И., Руденко А.В. — Северодвинск: РИО Севмашвуза, 2007. — 125с.
12. Короткин В.И. Сравнение зубчатых передач Новикова и эвольвентных передач [Текст] / Короткин В.И. // Вестник машиностроения. — 2009. — №1. — С. 3-8
13. Ф.Л. Литвин. Теория зубчатых зацеплений [Текст]. / Ф.Л. Литвин. — 2 изд. — Москва: Наука, 1968. — 584с.
14. Тупицын А.А. Альтернативный вид зубчатого зацепления: свойства и характеристики [Текст] / Тупицын А.А., Ревенский А.А. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2010. — №4. — С. 84-91.
15. Буров, Ю. Ф. Несущая способность азотированных передач Новикова с различными исходными контурами [Текст] / Ю. Ф. Буров // Горные машины. Конструкции, расчет и исследование: сборник науч. тр. / НИПИГОР-МАШ. — Свердловск, 1982. — С. 148 — 150.
16. Мятлин, М.М. Зацепление Новикова: реальные возможности / М. Я. Иткис, И. М. Шандыбина // Редукторы и приводы. - 2007. - №4, 5. — С. 69-70.
17. ГОСТ 15023-76. Передачи Новикова цилиндрические с двумя линиями зацепления. Исходный контур. — Введ. 1976.07.30. — М. Изд. Стандартов, 1976. — 3 с.
18. Ачеркан, Н. С. Справочник машиностроителя: в 6-ти т. / Н.С. Ачеркан; - Москва: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1955. — 568 с. — 1 т.
19. И. П. Иванов Сравнительные испытания зубчатых передач Новикова // Записки горного института. - 1970. - №60. — с. 120 — 130.
20. Горovenko Л.А. Математические методы компьютерного моделирования физических процессов: учебное пособие [Текст] / Л.А. Горovenko. — Армавир: РИО АГПУ, 2016. — 104 с.
21. Горovenko Л.А. Математические методы компьютерного моделирования физических процессов [Текст] / Горovenko Л.А. // Международный журнал экспериментального образования. — 2017. — № 2. — С. 92-93.
22. Горovenko Л.А. Теория и практика компьютерного моделирования физических процессов: учебное пособие [Текст] / Горovenko Л.А., Коврига Е.В. — Армавир: РИО АГПУ, 2017. — 132 с.
23. Клеников С.С. Расчет геометрии волнового зацепления с циклоидальной формой и сил взаимодействия с зубьев колес / Клеников С.С. // Вестник московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. — 2015. — № 2(101). — С. 107-117.
24. Голиус Д.А. Циклоиды и их применение при проектировании деталей машин и их механизмов / Голиус Д.А., Горovenko Л.А. // Международный студенческий научный вестник. — 2017. — № 4-7. — С. 1037-1040.
25. Балденко Д.Ф. Циклоидальное зацепление в нефтепромысловой технике: традиционные и новые области применения [Текст] / Балденко Д. Ф., Балденко Ф. Д. // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. — 2010. - № 10. — С. 2-6.
26. Балденко Ф.Д. Перспективные применения циклоидального зацепления в нефтегазовой отрасли [Текст] // Территория нефтегаз. — 2014. - № 6. — С. 16-17.
27. Ф.Л. Литвин. Теория зубчатых зацеплений [Текст]. 2 изд. / Ф.Л. Литвин. — Москва: Наука, 1968. — 584с.
28. Федоткин Р.С. Методика проектирования ведущих цевочного зацепления с резиноармированными гусеницами тяговых и транспортных машин [Текст] / Федоткин Р.С., Крючков В.А., Бейненсон В.Д., Парфенов В.Л. // Тракторы и сельхозмашины. — 2017. - № 3. — С. 24-32.
29. Егоров И.М. Математическое моделирование погрешностей изготовления элементов цевочной передачи планетарного редуктора [Текст] / Егоров И.М., Алексанин С.А., Федосовский М.Е., Кряжева Н.П. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2014. — №6(94). — С. 171-176.
30. Кравчук А.С. Оптимизация цевочного зацепления планетарного цевочного редуктора одной кинематической схемы [Текст] / Кравчук А.С., Кравчук А.И. // APRIORI. Серия: естественные и технические науки. — 2016. - № 5. — С. 6.
31. Киреев С.О. Планетарные передачи с внецентроидным внутренним цевочным зацеплением в машиностроении [Текст] / Киреев С. О. // Вестник донского государственного технического университета. — 2011. - № 7(58). — С. 1051-1058.
32. А.Л. Филипенков Анализ геометрии и нагрузочной способности ЭЦ — зацепления [Текст] / А.Л. Филипенков // Вестник машиностроения. — 2016. — №6. — С. 7-13.

33. Щербаков Н.Р. Математическое и компьютерное моделирование динамического состояния передачи движения [Текст]: дис.....канд. физ. мат. наук: защищена 25.07.07 утв. 16.02.09/ Щербаков Николай Романович. –Томск, 2009. – 213с.
34. Становской В.В. Новый вид зацепления колес с криволинейными зубьями / Становской В.В., Казакивичюс С.М., Ремнева Т.А., Кузнецов В.М., Бубенчиков А.М., Щербаков Н.Р. // Справочник. Инженерный журнал / Москва: ООО «Издательский дом «Спектр», 2008 г. – № 9. – С. 34-40.
35. Становской В.В. Разработка и внедрение ресурсосберегающей техники нового поколения на основе эксцентриково-циклоидального зацепления / Становской В.В., Казакивичюс С.М., Кузнецов В.М. // Исследования и разработки. – 2013. – №12(182). – С. 117-120.
36. Технология Маркет [Электронный ресурс] / ЗАО «Технология маркет». – Сайт компании. - Томск, 2018. – Режим доступа: <http://ec-gearing.com/>, свободный (дата обращения: 13.08.2018).
37. Становской В.В. Эксцентриково-циклоидальное зацепление с увеличенными радиусами кривизны / Становской В.В., Казакивичюс С.М., Ремнева Т.А., Кузнецов В.М. // Теория и практика зубчатых передач и редуктостроения: сб. докл. научно-тех. конф. / ИжГТУ. – Ижевск, 2017. – С. 15–19.
38. Казакивичюс С.М., Становской В.В., Ремнева Т.А., Кузнецов В.М., Бубенчиков А.М., Щербаков Н.Р. Работоспособность эксцентриково-циклоидального зацепления при изменении межосевого расстояния колес. модификация вершин и впадин зубьев // Вестник машиностроения. - 2011. - №3. - С. 7-9.
39. Леонтьев М.Ю. Обзор достоинств и недостатков эксцентриково-циклоидального зацепления / Леонтьев М.Ю., Раевский В.А., Смоловик А.Е. // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2016. - №7(5). – С. 54-57.
40. Heliwhale [Электронный ресурс] / ООО «Хеливейл». – Сайт компании. - Кемерово, 2014. – Режим доступа: <http://heliwhale.ru/>, свободный (дата обращения: 13.08.2018).
41. Аксенов, В.В. Обоснование потребности проведения научных исследований в области модернизации трансмиссии геохода / В.В. Аксенов, Г.М. Дубов, Д.С. Трухманов, В.Е. Ашихмин, А.А. Чегошев // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции. – Прокопьевск: изд-во филиала КузГТУ в г. Прокопьевске, 2018. – С. 298-302.
42. Трухманов, Д.С. Обоснование актуальности использования в трансмиссии геохода эксцентриково-циклоидального зацепления / Д.С. Трухманов, В.В. Аксенов, Г.М. Дубов // Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов IX Международной научно-практической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – С. 248-253.
43. Georgiy Dubov, Dmitriy Trukhmanov, Aleksey Chegoshev, Vitaliy Ashikhmin. Substantiation of the Need to Create an Eccentric Cycloidal Gearing Transmission of Geokhod. E3S Web Conf. 41 03008 (2018). DOI: 10.1051/e3sconf/20184103008
44. Дубов Г.М. Обоснование необходимости создания трансмиссии геохода с зубчатой передачей / Г.М. Дубов, М.С. Данилов, Д.С. Трухманов // Горное оборудование и электромеханика / Кемерово: Издательский центр УИП КузГТУ, 2018. - №4(138). – С. 19-26.
45. Пат. 2354870 Российская Федерация, МПК51 F16H 1/10. Торцевая зубчатая передача с внутренним зацеплением [Текст] / Тупицын А. А. (RU), Каргапольцев С. К. (RU), Милованов А. И. (RU), Тупицын А. А. (RU), Ревенский А. А. (RU); заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС (ИрИИТ)) (RU). – № 2007144586/11; заявл. 04.12.07; опубл. 10.05.09, Бюл. 13. – 4с.
46. Ревенский А.А. Возможность использования торцевого зубчатого зацепления в передачах различной компоновки [Текст] / Ревенский А.А. // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – №1(13). – С. 176-178.
47. Ревенский А.А. Моделирование торцевой зубчатой передачи [Текст] / Ревенский А.А., Гозбенко В.Е. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – № 3(31). – С. 119-123.
48. Тупицын А.А. Торцовая зубчатая передача с внутренним цевочным зацеплением [Текст] / Тупицын А.А., Нечаев В.В., Гозбенко В.Е. // Современные технологии. Математика. Механика и машиностроение. – 2014. – №3. – С. 25-29.
49. Политехнический словарь-справочник [Электронный ресурс] / Политехнический словарь-справочник инженера Алексеева 2012-2018. - Режим доступа: <http://s0alex.ru/abc10m31.html>, свободный (дата обращения: 30.07.2018).
50. Л.Д. Антонова. Исследование влияния коэффициента перекрытия торцово-зубчатой передачи на заострение зубьев колес [Текст] / Л.Д. Антонова, П.В. Прыгунов // Решетневские чтения. – 2010. – №14. – С. 211-212.
51. Е. А. Милованова. Применение идеи "Передачи Нечаева" при разработке компоновочной схемы тягового привода локомотива с параллельными потоками мощности [Текст] / Е. А. Милованова, А. А.

- Милованов, А. И. Милованов // Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации. – 2012. – №3(11). – С. 78–82.
52. А. с. 506714 СССР, МПК5 F16H 55/08. Зубчатая передача с торцовыми зубьями [Текст] / А. И. Нечаев. – № 1908398/25–28; заявл. 17.04.73; опубл. 15.03.76. Бюл. № 10. – 2 с.
53. Нечаев А. И. Торцевые зубчатые передачи и механизмы, построенные на их базе [Текст] / А. И. Нечаев, Е. Г. Синенко, П. Н. Сильченко // Наука производству. – 2000. – №3(28).
54. Введенский Б.А. Большая советская энциклопедия [Текст] в 51 т. / Введенский Б.А.; — Москва: «Большая Советская энциклопедия», 1956. — С. 188-189. – 44 т.
55. Ф.Л. Литвин. Теория зубчатых зацеплений [Текст]. 2 изд. / Ф.Л. Литвин. – Москва: Наука, 1968. – 584с.
56. Тупицын А.А. Альтернативный вид зубчатого зацепления: свойства и характеристики [Текст] / Тупицын А.А., Ревенский А.А. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2010. - №4. - С. 84-91.
57. Л.Д. Антонова. Исследование влияния коэффициента перекрытия торцово-зубчатой передачи на заострение зубьев колес [Текст] / Л.Д. Антонова, П.В. Прыгунов // Решетневские чтения. – 2010. – №14. – С. 211-212.
58. Е. А. Милованова. Применение идеи "Передачи Нечаева" при разработке компоновочной схемы тягового привода локомотива с параллельными потоками мощности [Текст] / Е. А. Милованова, А. А. Милованов, А. И. Милованов // Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации. – 2012. – №3(11). – С. 78–82.

REFERENCES

1. Kuklin, N.G. Details of machines / N.G. Kuklin, G.S. Kuklina. – Moscow: Higher school, 1987. – 383 pp.
2. G.B. Iosilevich. Details of machines [Text] / G.B. Iosilevich. – Moscow: Mashinostroenie, 1988. – 368 pp.
3. Skoybeda, A.T. Machine parts and design basics / Skoybeda A.T., Kuzmin A.V., Makeychyk N.N., Under the editorship. Skoybeda A.T. - Minsk: Higher school, 2006. – 560 pp.
4. I.A. Bolotovskiy. Guide of geometric calculation of involute gears and worm gears [Text] / I.A. Bolotovskiy, V.I. Bezrukov, O.F. Vasilieva, V.I. Guryev, M.L. Erihow, A.B. Efimenko, V.P. Kotelnikov, B.A. Kurllov, L.L. Rusak, V.E. Smirnov, B.I. Shenderoy. – Moscow: «Machine building», 1986 – 448 pp.
5. Ermak V.N. Theory of machines and mechanisms (short course) [Text] / B.N. Ermak, N.P. Kuryshkin. – Kemerovo: KuzSTU, 2011. – 194 pp.
6. A. F. Krainev. Dictionary-reference on mechanisms [Text] / A. F. Krainev. – Moscow: Mashinostroenie, 1987. – 560 pp.
7. Patent Russian Federation 2151933, MPK51 F16H 1/06, B23F 5/14, B23F 5/22. Involute gearing [Text] / Kochetkov A.F.; applicant and patent holder Ulyanovsk state technical University. – № 98103606/02; Statement 18.12.00; Published 27.06.2000, Bulletin № 18. – 5 pp.
8. Gruzdev D.E. Development of methods for geometric and strength design of the mechanical transmission gear to "snail Pascal" [Text]: thesis. Candidate technical science: 05.02.02: secure: approved. / Gruzdev Dmitrii Evgenievich. – Krasnoyarsk, 2004. – 110 pp.
9. Tupitsyn A. A. End gearing with internal gearing [Text] / Tupitsyn A. A., Nechaev V. V., Gozbenko V. E. // Modern technology. Mathematics. Mechanics and engineering. – 2014. – №3. – pp. 25-29.
10. State Standard 16530-83. Gear drive. General terms, definitions and designations [Text]. — Instead GOST 16530-70; Introduced 1984-01-01. — Moscow: A Mockery Of The Standards, 2004. — 50 pp.
11. Babkin A.I. Details of machines and fundamentals of design 6 semester [Text] / Babkin A.I., Rudenko A.V. – Severodvinsk: Editorial and publishing Department of St. Petersburg state marine technical University, 2007. – 125 pp.
12. Korotkin V.I. Comparison of Novikov gears and involute gears [Text] / Korotkin V.I. // Bulletin of machine building. – 2009. – №1. – pp. 3-8
13. F.L. Litvin. Theory of gearings [Text] / F.L. Litvin. – 2nd edition – Moscow: science, 1968. – 584 pp.
14. Tupitsyn A.A. Alternative gearing type: properties and characteristics [Text] / Tupitsyn A.A., Revenskiy A.A. // Modern technology. System analysis. Modeling. – 2010. – №4. – pp. 84-91
15. Burov, U. F. Load bearing capacity of nitrated Novikov's gear with various of initial contours [Text] / U. F. Burov // Mining machines. Constructions, calculation and research: collection of scientific papers / RDIM-PE. – Sverdlovsk, 1982. – pp. 148-150.

16. Myatlin, M.M. The Novikov gearing: a real opportunitys / Myatlin, M.M., Itkis M.I., I. M. Shandybina // Gearboxes and drives. - 2007. - №4, 5. - pp. 69-70.
17. State Standard 15023-76. Novikov cylindrical transmission with two lines of engagement. Source path. - Introduced 1976.07.30. - Moscow: Standards Publishing House, 1976. - 3 pp.
18. Acharkan N.S. Handbook of machine-building: in six volumes / Acharkan N.S.; - Moscow: State scientific and technical publishing house of machine-building literature, 1955. - 568 pp. - Vol. 1.
19. I. P. Ivanov. Comparative tests of Novikov gears // Proceedings of the mining Institute. - 1970. - №60. - pp. 120 - 130.
20. Gorovenko L.A. Mathematical methods of computer simulation of physical processes: tutorial [Text] / Gorovenko L.A. - Armavir: Editorial and publishing Department of Armavir state pedagogical University, 2016. - 104 pp.
21. Gorovenko L.A. Mathematical methods of computer simulation of physical processes [Text] / Gorovenko L.A. // International journal of experimental education. - 2017. - № 2. - pp. 92-93.
22. Gorovenko L.A. Theory and practice of computer simulation of physical processes: [Text] / Gorovenko L.A., Kovriga E.V. - Armavir: Editorial and publishing Department of Armavir state pedagogical University, 2017. - 132 pp.
23. Klenikov S.S. Calculation of the geometry of wave gearing with the cycloidal shape and the forces of interaction with the teeth of the wheels / Klenikov S.S. // Bulletin of Moscow state technical University. N. E. Bauman. Series: Machine-building. - 2015. - № 2(101). - pp. 107-117.
24. Golius D.A. Cycloids and their application in the design of machine parts and their mechanisms / Golius D.A., Gorovenko L.A. // International student scientific Bulletin. - 2017. - № 4-7. - pp. 1037-1040.
25. Baldenko D.F. Cycloidal gearing in oilfield technology: traditional and new applications [Text] / Baldenko D.F., Baldenko F.D. // Construction of oil and gas wells on land and at sea. - 2010. - № 10. - pp. 2-6.
26. Baldenko F.D. Promising applications of cycloidal gearing in the oil and gas industry [Text] // Territory oilgas. - 2014. - № 6. - pp. 16-17.
27. F.L. Litvin. Theory of gearings [Text] / F.L. Litvin. - 2nd edition - Moscow: Science. - 1968. - 584 pp.
28. R. S. Fedotkin. The design method of leading gear engagement with rubber reinforced caterpillars of traction and transport machines [Text]. // R. S. Fedotkin, Kryuchkov V. A., Benenson, V. D., Parfenov V. L. // Tractors and agricultural machinery. - 2017. - № 3. - pp 24-32.
29. Egorov I. M. Mathematical modeling of manufacturing errors of elements of handover planetary gear train [Text] / Egorov I. M., Aleksanin S. A., Fedosovsky M. E., Kryazheva N. P. // Journal scientific and technical of information technologies, mechanics and optics. - 2014. - №6(94). - pp 171-176
30. Kravchuk A. S. Optimization of interaction of planetary gears of one kinematic scheme [Text] / Kravchuk A. S., Kravchuk A. I. // APRIORI. Series: Natural and technical sciences. - 2016. - № 5. - pp 6.
31. Kireev S. O. Planetary gears by internal gearing in mechanical engineering [Text] / Kireev S. O. // Bulletin of don state technical University. - 2011. - № 7(58). - pp 1051-1058.
32. A. L. Filipenko The analysis of the geometry and load capacity eccentric-cycloidal gearing [Text] / A. L. Filipenko // Bulletin of machine building. - 2016. - №6. - pp 7-13.
33. Scherbakov N. R. Mathematical and computer modeling of dynamic state of motion transmission [Text]: thesis ... candidate physical and mathematical science: secure 25.07.07 approved. 16.02.09/ Shcherbakov Nikolay Romanovich. - Tomsk, 2009. -213 pp.
34. Stanovskoy V. V. A new type of engagement of wheels with curved teeth / Stanovskoy V. V., Kazakyavichyus S. M., Remneva T. A., Kuznetsov V. M., Bubenichikov A. M., Scherbakov N. R. // Handbook. Engineering journal / Moscow: LLC Publishing house "Spectrum", 2008. - № 9. - pp 34-40.
35. Stanovskoy V. V. Development and implementation of resource-saving technology of new generation on the basis of eccentric-cycloidal gearing / Stanovskoy V. V. Kazakyavichyus, S. M., Kuznetsov V. M. // Research and development. - 2013. - №12(182). - pp 117-120.
36. UAB Technology market. - Company Website. - Tomsk, (2018). - <http://ec-gearing.com/> (date of the application: 13.08.2018).
37. Stanovskoy V. V. Eccentric-cycloidal engagement with a larger radius of curvature / Stanovskoy V. V., Kazakevicius S. M., Remneva T. A., Kuznetsov V. M. // Theory and practice of gears and gear construction: collection of reports of scientific and technical conference / ISTU. - Izhevsk, 2017. - pp 15-19.
38. Kazakyavichyus, S. M., Stanovskoy V. V., Remneva T. A., Kuznetsov V. M., A. M. Bubenichikov, Shcherbakov N. R. Efficiency eccentric-cycloidal engagement when changing the center distance of the wheels. modification of the peaks and troughs of the teeth // Bulletin of mechanical engineering. - 2011. - №3. - pp 7-9.
39. Leont'ev M. Yu. Overview of advantages and disadvantages eccentric-cycloidal engagement / Leont'ev M. Yu., V. Raevsky, A. E. Smolovik // Actual problems of Humanities and natural Sciences. - 2016. - №7(5). - pp 54-57.
40. Heliwhale / LLC Heliwhale. - Company site. - Kemerovo 2014. -<http://heliwhale.ru/> (date of the application: 13.08.2018).

41. Patent Russian Federation 2354870, IPC51 F16H 1/10. Butt gear with internal gearing [Text] / Tupitsyn A. A. (RU), Kargapol'tsev S. K. (RU), Milovanov A. I. (RU), Tupitsyn A. A. (RU), Revenskoy A. A. (RU); applicant and patent holder state educational institution of higher professional education Irkutsk state University of railway engineering (IrGUPS (IrIIT)) (RU). - № 2007144586/11; declared. 04.12.07; published. 10.05.09, Bulletin 13. - 4 pp.
42. Aksenov, V. V. Justification of the need for scientific research in the field of modernization of the geokhod's transmission / V.V. Aksenov, G.M. Dubov, D.S. Trukhmanov, V.E. Ashikhmin, A.A. Chegoshchev // Prospects of innovative development of the coal regions of Russia: Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference. – Prokopyevsk: Branch Kuzbass State Technical University in Prokopyevsk, 2018. – pp. 298-302.
43. Trukhmanov, D.S. Justification of the relevance of the use of eccentric-cycloidal gearing in the geokhod's transmission / D.S. Trukhmanov, V.V. Aksenov, G.M. Dubov // Innovative technologies in mechanical engineering: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference. – Tomsk: Publisher TPU, 2018. – pp. 248-253.
44. Georgiy Dubov, Dmitriy Trukhmanov, Aleksey Chegoshchev, Vitaliy Ashikhmin. Substantiation of the Need to Create an Eccentric Cycloidal Gearing Transmission of Geokhod. E3S Web Conf. 41 03008 (2018). DOI: 10.1051/e3sconf/20184103008
45. Dubov G.M. Justification of the need for creation of the geokhod's transmission with gear train / G.M. Dubov, M.S. Danilov, D.S. Trukhmanov // Mining machinery and electromechanics / Kemerovo: Publishing Center MIP KuzSTU, 2018. - №4 (138). – pp. 19-26.
46. Revenskoy A.A. The ability to use the in the butt gears of different layouts [Text] Revenskoy A.A. // Systems. Methods. Technologies. – 2012 – №1(13). – pp 176-178.
47. Revenskoy A.A. Modeling of the butt gears [Text] / Revenskoy A.A. Gasenko, V. E. // Modern technology. System analysis. Modeling - 2011. - № 3(31). - pp 119-123.
48. 49. Tupitsyn A.A. Face gear with internal cycloid toothing [Text] / Tupitsyn A.A., Nechaev V.V., Gozbenko V.E. // Modern technologies. Mathematics. Mechanics and engineering. - 2014. - №3. - pp 25-29.
49. Polytechnic dictionary-reference book [Electronic resource] / Polytechnic dictionary-reference book engineer Alekseev 2012-2018. - <http://s0alex.ru/abc10m31.html> (date of the application: 30.07.2018).
50. L.D. Antonova. Research effect the coefficient of overlap face-toothed gear on teeth sharpening [Text] / L.D. Antonova, P.V. Prigunov // Reshetnevskie chteniya. - 2010. - №14. - pp 211-212.
51. E. A. Milovanova. Application of the idea "Nechaev's Transmission" by development layout diagram tractive gear of the locomotive with the parallel flow capacity [Text] / E. A. Milovanova, A. A. Milovanov, A. I. Milovanov // Information technologies, automatics, connection, telecommunication. - 2012. - №3(11). - pp 78-82.
52. A. c. 506714 USSR, MPK5 F16H 55/08. Gear transmission with face teeth [Text] / A. I. Nechaev. – № 1908398/25–28; declared 17.04.73; published 15.03.76. № 10. – 2 pp.
53. Nechaev A. I. Face teeth gears and built on their base mechanisms [Text] / A. I. Nechaev, E. G. Sinenko, P. N. Silchenko // Science to production. - 2000. - №3(28).
54. Vvedensky B. A. Big soviet encyclopedia [Text] in 51 vol. / Vvedensky B. A.; — Moscow: Big Soviet encyclopedia, 1956. – pp 188-189. - Vol. 44.
55. F. L. Litvin. Theory of the gears [Text]. 2nd edition. / F. L. Litvin. - Moscow: Science, 1968. - 584 pp.
56. Tupitsyn A.A. Alternative form of gear: properties and characteristics [Text] / Tupitsyn A.A., Revensky A.A. // Modern technologies. System analysis. Modding. - 2010. - №4. - pp 84-91.
57. L.D. Antonova. Research effect the coefficient of overlap face-toothed gear on teeth sharpening [Text] / L.D. Antonova, P.V. Prigunov // Reshetnevskie chteniya. - 2010. - №14. - pp 211-212.
58. E. A. Milovanova. Application of the idea "Nechaev's Transmission" by development layout diagram tractive gear of the locomotive with the parallel flow capacity [Text] / E. A. Milovanova, A. A. Milovanov, A. I. Milovanov // Information technologies, automatics, connection, telecommunication. - 2012. - №3(11). - pp 78-82.

Поступило в редакцию 08.12.2018

Received 08 December 2018