

ПРИБЛИЖЕННЫЕ ЗУБЧАТЫЕ ПЕРЕДАЧИ С КУСОЧНО-ЛИНЕЙНЫМ КОНТАКТОМ

Б. П. ТИМОФЕЕВ¹, М. Ю. ПОНОМАРЕНКО², А. В. КОВАЛЕВИЧ¹

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: timofeev@mail.ifmo.ru

ООО „Абсолют“, 197082, Санкт-Петербург, Россия

Проанализированы возможности зубчатых передач зацеплением при использовании простейших поверхностей — плоскости, цилиндра и их различных сочетаний, в качестве рабочих поверхностей зубьев. Показано, что при таких простейших очертаниях зубьев можно получить качественную передачу. Получившиеся значения ошибки положения и передаточного отношения минимальны и, в частности, для многорядных передач могут быть пренебрежимо малы. Производятся расчеты кинематических параметров предложенных вариантов зацепления. Перспективы применения передач с простейшими очертаниями зубьев связаны с отсутствием необходимости в сложном обрабатывающем оборудовании и возможностью изготовления и ремонта в полевых условиях.

Ключевые слова: зубчатая передача, зубчатое зацепление, незвольwentное зацепление, моделирование зацепления, приближенные передачи, погрешность зубцовой частоты, бескромочный контакт, многорядная передача

В настоящее время в основном используются передачи, в которых сопряженные поверхности зубьев являются взаимно огибающими в своем относительном движении. Воспроизведение таких поверхностей высоких порядков требует использования сложного и дорогостоящего оборудования. В представленной работе рассматриваются приближенные зубчатые передачи, основанные на простейшей геометрии зуба. Проанализируем цилиндрическую передачу, состоящую из цевки (цилиндра) и прямоугольного в сечении поводка, рабочая поверхность которого представлена плоскостью [1].

До построения математической модели необходимо определить геометрические параметры рассматриваемой зубчато-поводковой передачи [2—7]:

$$2\pi R_1 = pz_1, \quad (1)$$

$$2\pi R_2 = pz_2, \quad (2)$$

$$p = \pi m, \quad (3)$$

$$R_c = \frac{mz_1}{2}, \quad (4)$$

$$p = 4\rho + c'\rho, \quad (5)$$

где R_c — радиус начальных окружностей, m — модуль зубьев, z_1 — число зубьев шестерни, z_2 — число зубьев цевки, ρ — радиус поводка, c' — коэффициент углового зазора. Также необходимо определить высоту ножки h_f и головки h_a поводка:

$$h_f = \rho + c^* m, \quad (6)$$

$$h_a = h_a^* m, \quad (7)$$

где c^* — коэффициент окружного зазора, h_a^* — коэффициент высоты головки зуба.

При анализе основное внимание уделено оценке величины циклической погрешности передачи зубцовой частоты. Исследуем зависимость этого параметра от высоты поводка (линейной координаты u), оценивая тем самым качество зацепления.

На рис. 1 представлены графики циклической погрешности зубчатой передачи при различной высоте поводка ($1 - \Delta\varphi_2(\varphi_1)$ — ошибка положения, $\Delta\varphi_2 U_i(\varphi_1)$ — ошибка положения $\Delta\varphi_2$ при $U_i = h_a^* h_{fi}^* = 0 - 2; 0,1 - 3; 0,2 - 4; 0,3 - 5; 0,4 - 6; 0,5 - 7; 0,6 \text{ м} - 8$). Установлено, что исключить кромочный контакт не представляется возможным ни при каких значениях высоты поводка. Наименьшая циклическая погрешность, и следовательно наилучший результат, получается при $h_a^* = 0,1$ (кривая 2).

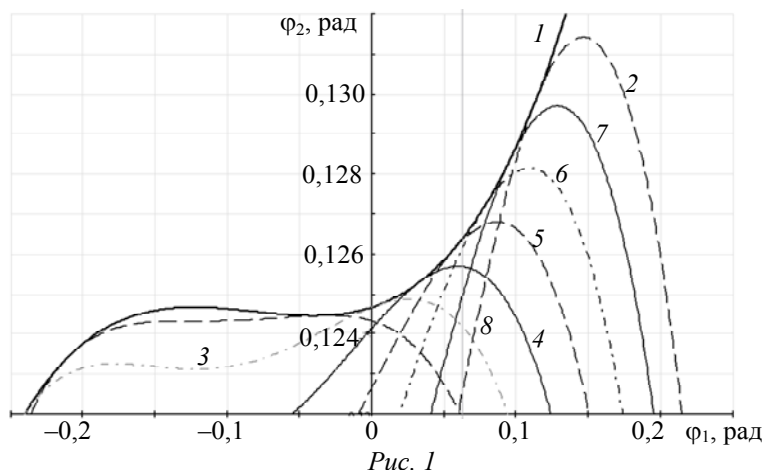


Рис. 1

На рис. 2 представлен график функции ошибки положения $\Delta\varphi_2(\varphi_1)$ (зацепление кромка—окружность при $h_a^* = 0,1$). Функция состоит из двух участков: первый характеризует взаимодействие плоскости с цилиндром, второй — кромки с цилиндром.

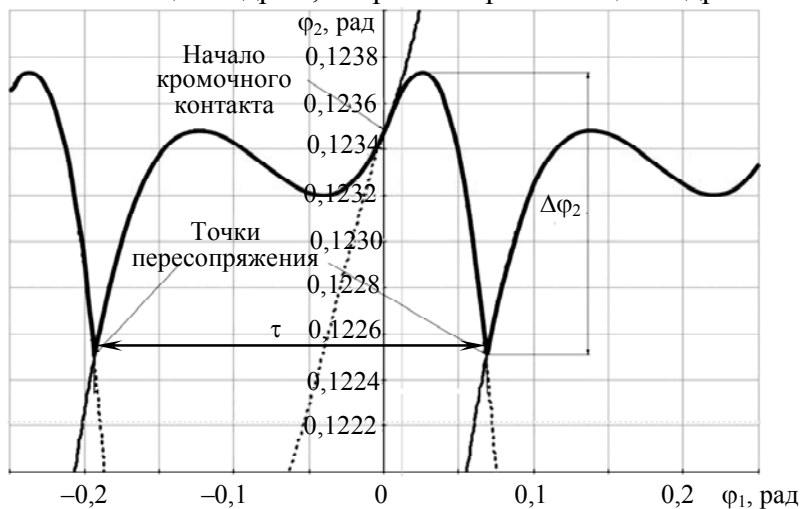


Рис. 2

В табл. 1 приведены ошибки положения и передаточного отношения, полученные при коэффициенте перекрытия $\epsilon=1$ и различных параметрах h_a^* [8, 9].

Таблица 1

h_a^*	$\Delta\varphi_2 \cdot 10^3, \text{ рад}$	$\Delta i_{21} \cdot 10^{-3}$
0	3,3	119,4
0,1	1,2	99
0,2	1,6	123
0,3	3	143,4
0,4	4,8	200,6

Отметим, что $\varepsilon=1$ может быть получено только в тех случаях, когда числа зубьев z_1 и z_2 равны значениям, указанным в табл. 2.

Таблица 2

z_{1min}	z_2	i_{12min}
5	15	3
6	12	2
7	7	1

Исследуем теперь взаимодействие зуба с комбинированным профилем, составленным из цилиндра и плоскости. При этом объектом исследования являются профили с различными углами наклона рабочей поверхности по отношению к осевой плоскости зуба. Формы зубьев и цевки представляют прямые и дуги окружностей. Для исследования выберем три основные формы зуба (рис. 3) [10].

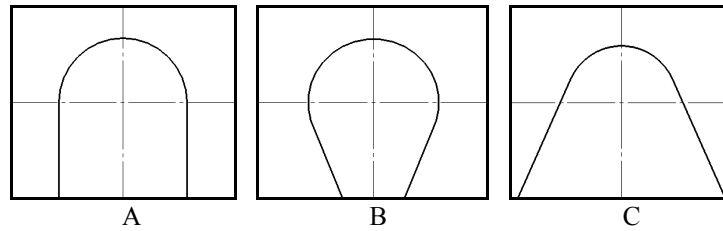


Рис. 3

Ошибку положения определим по формуле:

$$\Delta\varphi_2(\varphi_1) = \varphi_2(\varphi_1) - \varphi_1 i_{21}, \quad i_{21} = z_1/z_2. \quad (8)$$

Также необходимо определить реальное значение передаточного отношения. С этой целью найдем мгновенное передаточное отношение как дифференциал функции положения по углу поворота ведущего колеса φ_1 :

$$i_{21}(\varphi_1) = \frac{d\varphi_2(\varphi_1)}{d\varphi_1}, \quad (9)$$

для полученной функции (9) определим ошибку функции передаточного отношения как:

$$\Delta i_{21}(\varphi_1) = i_{21}(\varphi_1) - i_{n21}(\varphi_1). \quad (10)$$

Функция $\Delta i_{21}(\varphi_1)$ показывает отклонение от номинального передаточного отношения.

Моделирование зацепления [11] и анализа функций ошибок положения и передаточного отношения показало, что контакт острого зуба формы „В“ с цевкой предпочтителен: на протяжении всего времени зацепления функции положения и передаточного отношения не имеют скачков и резких переходов; они дифференцируемы и непрерывны на всем протяжении диапазона шага. Характерным отличием передачи является отсутствие ударов во время зацепления одной пары зубьев, поскольку отсутствует зацепление с участием кромки. Также преимуществом является минимальное значение ошибки положения ($\Delta\varphi_2(\varphi_1)$) при зацеплении одной пары: $\Delta y_{2max} = 0,006$ рад (эта величина сопоставима с циклической погрешностью зубцовой частоты в цилиндрической передаче).

Допуск на величину f_{zz0} для эвольвентных цилиндрических зубчатых передач обуславливает ГОСТ 1643-81 „Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски“:

$$f_{zz0} = \frac{\pi D / 2}{180^\circ} \Delta y_{2max} = 4,3 \text{ мкм}. \quad (11)$$

Полученное значение циклической погрешности зубцовой частоты примерно соответствует третьей (наивысшей) степени точности по показателю плавности работы f_{zz0r} .

Часовое зацепление является упрощенным циклоидальным. Зуб такой передачи очерчен двумя различными кривыми, сопряженными особой точкой — кромкой, в которой происходит контакт зубьев. В момент кромочного контакта значения ошибки положения, т.е. значения

систематической составляющей циклической погрешности передачи, принимают экстремальные значения. В этой связи циклоидальное зацепление чрезвычайно чувствительно к погрешности монтажа, заключающейся в ошибке межосевого расстояния. Таким образом, предложенные зацепления можно рассматривать как улучшенный вариант часового зацепления: благодаря отсутствию контакта на кромке. Вместе с тем, у принятой формы зуба минимальны значения амплитуд функций ошибок положения и передаточного отношения.

Элементарные передачи описанные выше, расположим в n рядов, сместив каждый последующий ряд на угол $\gamma = \frac{\tau}{n}$, где $\tau = \frac{2\pi}{z}$ — угловой шаг колеса. В результате получим многорядную (псевдокосозубую) передачу, в которой полностью отсутствуют осевые составляющие нагрузки.

На рис. 4 приведена 3D-модель многорядной передачи.

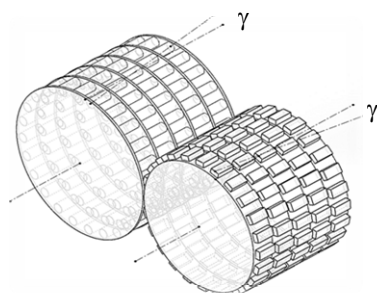


Рис. 4

На рис. 5, а представлена погрешность угла поворота $\Delta\varphi_2$ при пересопряжении пяти рядов колес $h_a^*=0$; на рис. 5, б приведена погрешность передаточного отношения Δi_{21} при пересопряжении пяти рядов колес для $h_a^*=0$. Фактические ошибки положения и передаточного отношения выделены на рис. 5 пунктиром.

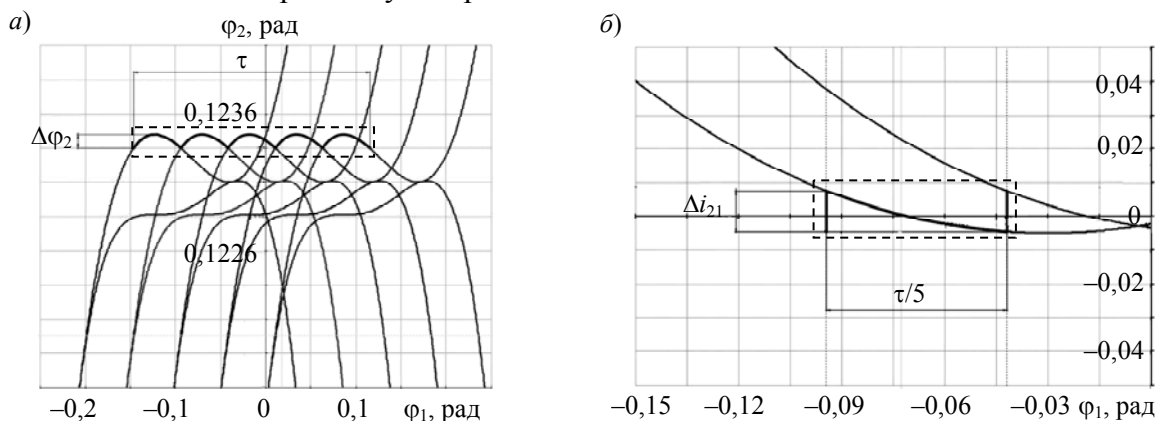


Рис. 5

В табл. 3 приведены характеристики качества зацепления.

Таблица 3

Передача	h_a^*	$\Delta\varphi_2$, рад	$\Delta i_{21} \cdot 10^{-3}$
Однорядная	0	0,0033	119,4
	0,1	0,0012	99
	0,2	0,0016	123
	0,3	0,003	143
	0,4	0,0048	200
Многорядная	0	0,00006	12,12
	0,1	0,00031	49,31

Из данных табл. 3 можно сделать вывод, что при однорядной поводково-цевочной передаче оптимальное значение $h_a^* = 0,1$, а при многорядной — 0 (при $h_a^* = 0$ был получен бескромочный контакт).

Значение циклической погрешности зубцовой частоты в многорядной передаче с $h_a^* = 0$ при $n = 5$ соответствует третьей степени точности по показателю плавности работы (ГОСТ 1643-81).

Таким образом, используя простейшие формы, можно получить передачу с рядом положительных свойств. Ошибки положения и передаточного отношения минимальны и, в частности, для многорядных передач могут быть пренебрежимо малы. Преимущество данного типа зубчатого зацепления заключается в простоте проектирования, изготовления и обслуживания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев Б. П., Уланов А. А. Кинематика зубчатых передач традиционного вида // Теория механизмов и машин. 2013. Т. 22, № 2.
2. Литвин Ф. Л. Теория зубчатых зацеплений. М.: Наука, 1968. 584 с.
3. Литвин Ф. Л. Проектирование механизмов и деталей приборов. М.: Машиностроение, 1973. 696 с.
4. Шевелёва Г. И. Теория формообразования и контакта движущихся тел. М., 1999. 494 с.
5. Артоболовский И. И. Теория механизмов. М.: Наука, 1965. 776 с.
6. Шевелева Г. И. Компьютерный анализ работы нагруженных конических зубчатых передач с учетом погрешностей [Электронный ресурс]: <http://gears.ru/shev_s3.htm>.
7. Машнев М. М., Красковский Е. Я., Лебедев П. А. Теория механизмов и машин и детали машин. Л.: Машиностроение, 1980.
8. Астафьев А. Ф. Инженерная справочная книга. Т. 2. М.—Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1937. 638 с.
9. Брицкий В. Д., Ноздрин М. А., Заморуев Г. Б., Тимофеев Б. П., Биндюк В. В., Резников С. С., Монахов Ю. С., Абрамчук М. В., Ларин М. С. Проектирование передаточного механизма. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. 155 с.
10. Ковалевич А. В., Тимофеев Б. П. Исследование кинематики неэвольвентной зубчатой передачи // Сб. тез. докл. конгресса молодых ученых [Электронный ресурс]: <<http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/5453/5453.pdf>>.
11. Mathcad // Exponenta.ru — образовательный математический сайт [Электронный ресурс]: <<http://www.exponenta.ru/soft/mathcad/mathcad.asp>>.

Сведения об авторах

- | | |
|---------------------------------------|--|
| Борис Павлович Тимофеев | — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра мехатроники; E-mail: timofeev@mail.ifmo.ru |
| Максим Юрьевич Пономаренко | — ООО „Абсолют“, конструкторский отдел; инженер-конструктор; E-mail: 79212196156@mail.ru |
| Александр Валерьевич Ковалевич | — аспирант; Университет ИТМО; кафедра мехатроники; E-mail: kovaevich@mail.ru |

Поступила в редакцию
21.11.17 г.

Ссылка для цитирования: Тимофеев Б. П., Пономаренко М. Ю., Ковалевич А. В. Приближенные зубчатые передачи с кусочно-линейным контактом // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 2. С. 135—140.

APPROXIMATE GEAR TRANSMISSION WITH A PIECE-LINEAR CONTACT

B. P. Timofeev¹, M. Yu. Ponomarenko², A. V. Kovalevich¹

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

E-mail: timofeev@mail.ifmo.ru

Absolute Ltd., 197082, St. Petersburg, Russia

The possibilities of gears with the use of the simplest surfaces - the plane, the cylinder and their various combinations — as working surfaces of the teeth are analyzed. It is shown that with such simple outlines of the teeth it is possible to obtain a high-quality transmission. The resulting values of position and gear ratio errors are minimal and in the case of multi-row transmissions can be negligible. Calculations of the kinematic parameters of the proposed engagement options are made. The prospects of using gears with the simplest outlines of teeth are associated with the absence of the need for complex processing equipment and the possibility of manufacturing and repairing in the field.

Keywords: gearing, non-involuntary gearing, gearing simulation, approximate gears, tooth frequency error, bezel contact, multi-row transmission

Data on authors

- | | |
|--------------------------------|--|
| Boris P. Timofeev | — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Mechatronics;
E-mail: timofeev@mail.ifmo.ru |
| Maxim Yu. Ponomarenko | — Absolute Ltd., Department of Design; Engineer-Designer;
E-mail: 79212196156@mail.ru |
| Alexander V. Kovalevich | — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Mecha-
tronics; E-mail: kovaevich@mail.ru |

For citation: Timofeev B. P., Ponomarenko M. Yu., Kovalevich A. V. Approximate gear transmission with a piece-linear contact. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 2. P. 135—140 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-2-135-140