

УДК 621.83.06

Е. С. Лустенкова

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КУЛАЧКОВ СФЕРИЧЕСКИХ РОЛИКОВЫХ ПЕРЕДАЧ

UDC 621.83.06

E. S. Lustenkova

CERTAIN ASPECTS OF MANUFACTURING CAMS OF SPHERICAL ROLLER TRANSMISSIONS

Аннотация

Рассмотрены вопросы, связанные с изготовлением кулачков сферических роликовых передач на вертикальном фрезерном станке с ЧПУ. Кулачки имеют сложные пространственные поверхности, образующие беговые дорожки для роликов. Представлены результаты компьютерного моделирования процесса формирования беговой дорожки. Получены параметрические уравнения замкнутой периодической кривой, расположенной на сферической поверхности. Данная кривая является траекторией движения центра рабочей части сферической фрезы. Начальная точка траектории выбрана так, чтобы уменьшить вероятность получения дефектов рабочих поверхностей кулачков. Проанализированы методы обработки сложных кулачковых поверхностей.

Ключевые слова:

сферическая роликовая передача, торцовый кулачок, тела качения, вертикально-фрезерный станок.

Abstract

The article deals with the issues related to the manufacturing of cams for spherical roller transmissions on a CNC vertical milling machine. The cams have a complex spatial surface forming the raceways for rollers. The results of computer simulation of the raceway formation are presented. Parametric equations for a closed periodic curve located on a spherical surface have been obtained. This curve is the motion trajectory of the center of the spherical cutter's working part. The starting point of the trajectory is selected so that to reduce the probability of defects of the working surfaces of cams. The methods for processing complex cam surfaces are analyzed.

Keywords:

spherical roller transmission, crown cam, rolling bodies, vertical milling machine.

Введение и постановка задачи

Сферические роликовые передачи (СРП) с двухрядным сателлитом [1] по структуре и принципу действия аналогичны планетарным зубчатым передачам [2] и имеют схожие преимущества и недостатки. Они позволяют реализовать широкий диапазон передаточных отношений. Данное преимущество, а также низкая материалоемкость, малая инерционность и соосность валов [3] дают возможность использовать их в качестве механических модулей – преобразова-

телей скоростей вращения и моментов в кинематических цепях роботов, манипуляторов. Большинство деталей исследуемых передач и редукторов, изготавливаемых на их основе, относительно технологичны, представляют собой тела вращения и могут изготавливаться на универсальном металлообрабатывающем оборудовании. Исключение составляют торцовые кулачки со сложными пространственными рабочими поверхностями, центровые профили которых расположены на сфере. Существуют различные способы обработки бего-



вых дорожек для тел качения передач рассматриваемого типа [4, 5]. С учетом изготовления экспериментальных образцов, т. е. единичного типа производства, наиболее целесообразным видится фрезерование кулачкового профиля на станках с ЧПУ. Разработаны алгоритмы и программы для вертикально-фрезерного станка с ЧПУ, позволяющие обрабатывать детали различных типовых размеров [6], однако практика показала необходимость их корректировки. Целью работы было усовершенствовать алгоритм изготовления данных кулачков, при котором погрешности профиля были бы минимальными.

Методы изготовления, оборудование и инструмент

В исследуемых СРП ролики двумя

коаксиально расположенными рядами устанавливаются в отверстия в сателлите. Эти два ряда роликов имеют выступающие концы сферической формы, которые контактируют с беговыми дорожками. Последние образуются двумя кулачками (рис. 1), смещенными друг относительно друга на половину периода периодической дорожки. Один из рядов роликов может контактировать только с одним кулачком, как правило, устанавливаемым на ведомом валу СРП. Это заменяет геометрическое замыкание вышних кинематических пар, образуемых телами качения и дорожкой, на силовое, приводит к снижению теоретически в два раза нагрузочной способности, но зачастую конструктивно неизбежно. Так или иначе, кулачковые профили для всех случаев изготавливаются аналогично.



Рис. 1. Кулачки, образующие беговую дорожку СРП

Для создания рабочих поверхностей кулачков применялся вертикально-фрезерный станок с ЧПУ ТМ1 фирмы HAAS (рис. 2, а), в качестве инструмента – сферические фрезы (рис. 2, б). Шаровидные бор-фрезы (слева на рис. 2, б) требуют малых припусков на обработку, поэтому использовались, в основном, концевые

фрезы со сферическим торцом. В процессе обработки центр рабочей части инструмента перемещается по замкнутой периодической траектории, расположенной на сферической поверхности. Эта траектория является центровой профилем кулачковой поверхности (центральной кривой).

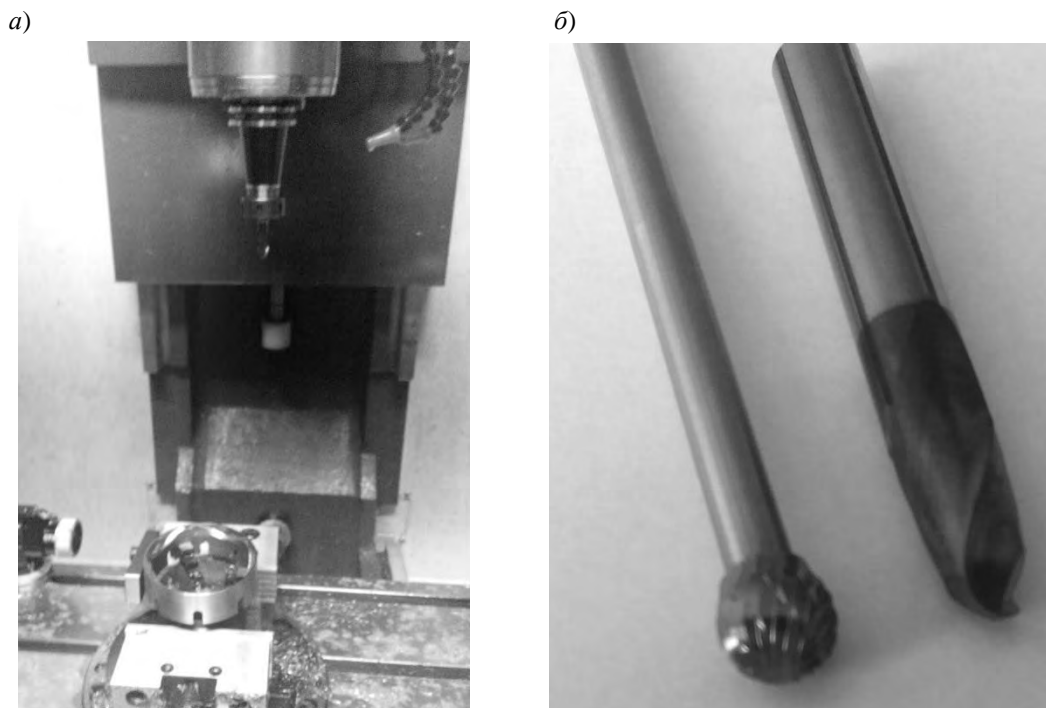


Рис. 2. Изготовление сферических кулачков: а – обработка дорожки на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ; б – применяемые виды сферических фрез (слева – шаровидная бор-фреза; справа – двузубая концевая фреза со сферическим торцом)

Уравнения центровых профилей кулачковых поверхностей, образующих

беговые дорожки, приведены в [6]. Они имеют следующий вид:

$$x(\varphi) = R \cdot (\cos(Z_3 \cdot \varphi) \cdot \cos((Z_3 + 1) \cdot \varphi) + \sin(Z_3 \cdot \varphi) \cdot \sin((Z_3 + 1) \cdot \varphi) \cdot \cos(\Theta)); \quad (1)$$

$$y(\varphi) = R \cdot (\cos(Z_3 \cdot \varphi) \cdot \sin((Z_3 + 1) \cdot \varphi) - \sin(Z_3 \cdot \varphi) \cdot \cos((Z_3 + 1) \cdot \varphi) \cdot \cos(\Theta)); \quad (2)$$

$$z(\varphi) = R \cdot \sin(Z_3 \cdot \varphi) \cdot \sin(\Theta), \quad (3)$$

где R – радиус основной сферы, поверхности, где располагаются центровые кривые; Z_3 – число периодов кривой; Θ – геометрическая постоянная; φ – центральный угол, изменяющийся от 0 до $2 \cdot \pi$.

Кривая (сплайн) 1, полученная по данным уравнениям с числом периодов $Z_3 = 6$, показана на рис. 3. Плоскость xOy совпадает с торцом кулачка, ось Oz направлена в его тело (тело заготовки).

Изготовление кулачкового профиля

производится методом т. н. последовательных приближений в горизонтальной плоскости. При этом в программе станка вариативным является параметр R , который изменяется от некоторого R_{\min} до собственно R . Количество проходов и глубина резания зависят от материала и размера (диаметра) рабочей части фрезы, равного диаметру сферической поверхности роликов, контактирующих с беговой дорожкой. Заключительный проход является чистовым, на него оставляется меньший припуск.



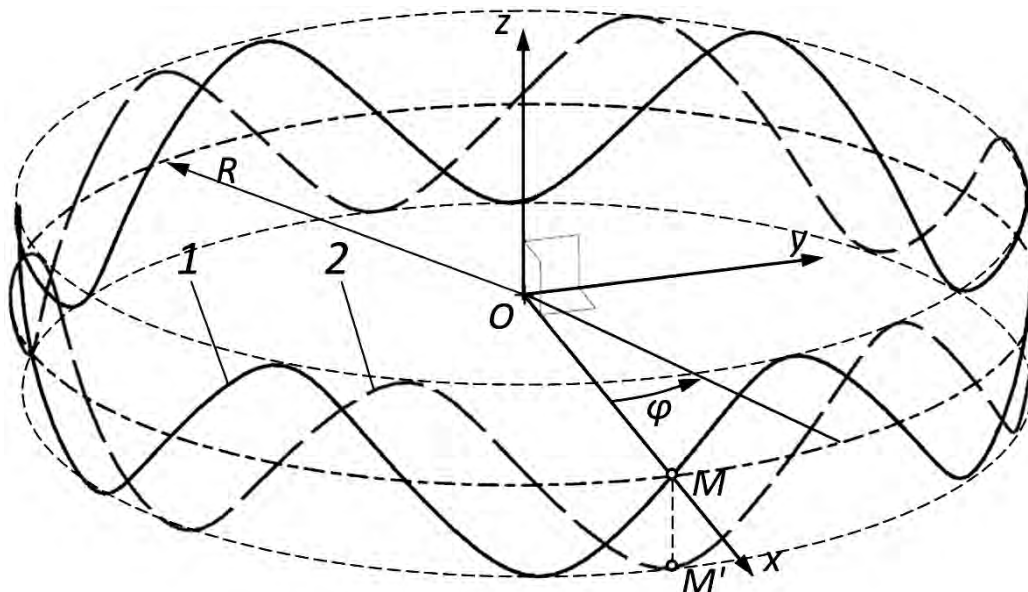


Рис. 3. Центровые профили кулачковых поверхностей: 1 – кривая по уравнениям (1)–(3); 2 – кривая по уравнениям (9)–(11)

На рис. 4 показан результат компьютерного моделирования в системе NX поэтапного удаления металла из тела заготовки. Заготовка 1 устанавливается на торец и крепится на столе в приспособлении. Базирование осуществляется по внутренней либо наружной цилиндрической поверхности. Фреза 2 по программе выходит в положение 2°, далее ее центр масс совершает перемещение по траектории 1, затем фреза устанавливается в промежуточное положение 2ⁿ и ее центр начинает движение по траектории 2. Заключительный проход начинается из положения 2^φ и осуществляется по траектории 3.

Корректировка уравнений центрального профиля

При изготовлении беговых дорожек с помощью концевой сферической фрезы на станке ТМ1 возникла следующая проблема. В результате изготовления на одной из вершин профиля образовывался дефект – срез части рабочей поверхности (рис. 5). Данный де-

фект предположительно был связан с перемещением фрезы в одно из начальных положений центра сферической фрезы при угле $\varphi = 0$. При этом координаты точки M (см. рис. 3) были равны: $x_M = R_j$; $y_M = 0$; $z_M = 0$, где R_j – текущее значение радиуса, изменяемое от R_{\min} до R .

Для устранения данного дефекта было предложено скорректировать уравнения (1)–(3) так, чтобы исходной точкой для начала обработки по проходу являлась одна из вершин кривой, лежащая изначально вне тела кулачка, т. е. точка M' (см. рис. 3).

При этом были проведены следующие математические преобразования для вывода уравнений, аналогичных формулам (1)–(3). Координаты окружности, лежащей в плоскости xOy с центром в точке O , описываются параметрическими уравнениями, которые представим в виде матрицы

$$C(\varphi) = \begin{pmatrix} R \cdot \cos(\varphi) \\ R \cdot \sin(\varphi) \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (4)$$



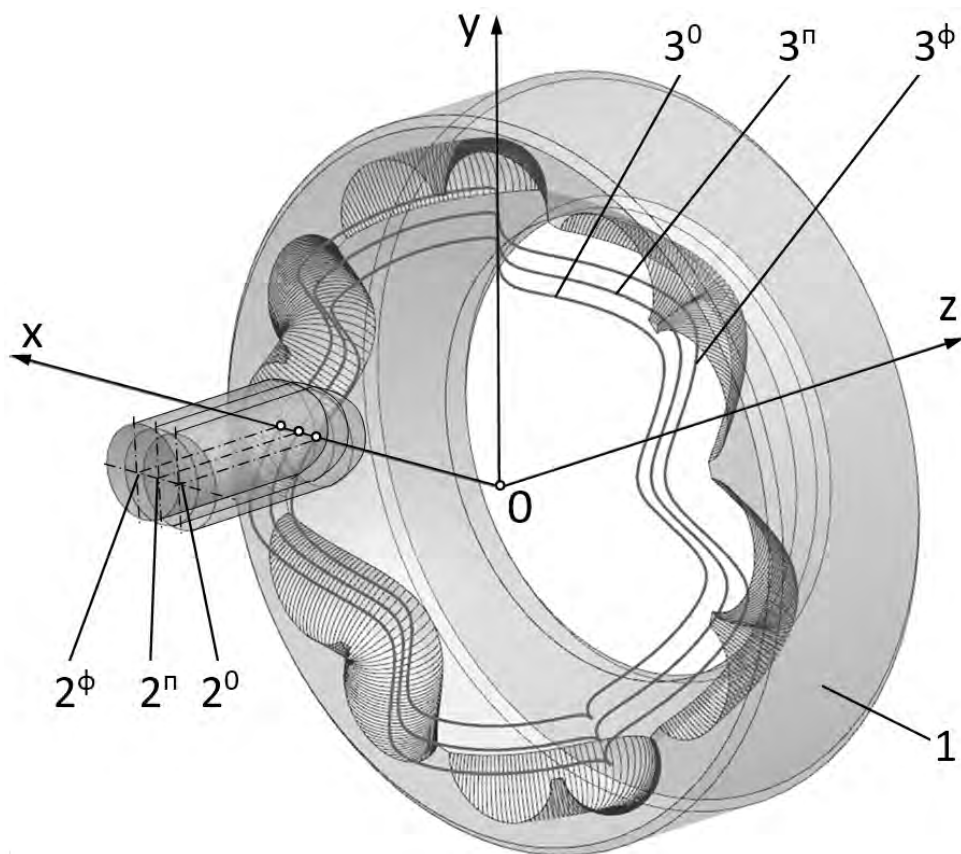


Рис. 4. Метод последовательных приближений: 1 – заготовка; 2 – инструмент; 3 – центровые кривые

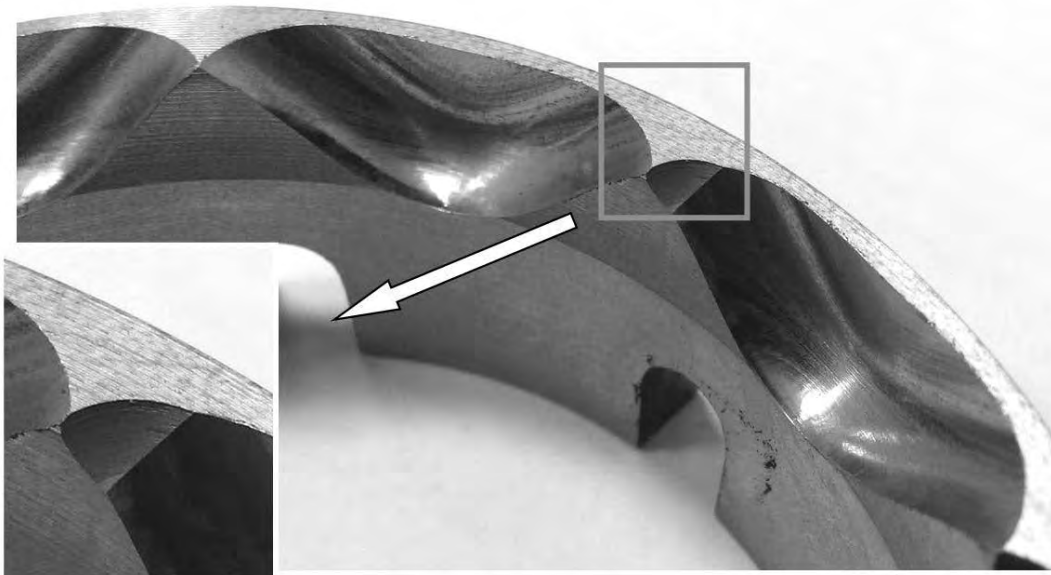


Рис. 5. Дефект кулачкового профиля

Оператор поворота окружности на данный угол описывается сле-

дующей матрицей:

$$M(x, y, z, \Theta) = \begin{pmatrix} \cos(\Theta) + K \cdot x^2 & K \cdot x \cdot y - \sin(\Theta) \cdot z & K \cdot x \cdot z + \sin(\Theta) \cdot y \\ K \cdot y \cdot x + \sin(\Theta) \cdot z & \cos(\Theta) + K \cdot y^2 & K \cdot y \cdot z - \sin(\Theta) \cdot x \\ K \cdot z \cdot x - \sin(\Theta) \cdot y & K \cdot z \cdot y + \sin(\Theta) \cdot x & \cos(\Theta) + K \cdot z^2 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где K – коэффициент, $K = 1 - \cos(\Theta)$.

Выполним операцию поворота окружности на угол Θ по отношению к оси Ox для того, чтобы начальная точка M' находилась на максимальном удалении от торца детали.

$$C_1(\varphi, \Theta) = M(1, 0, 0, \Theta) \cdot C(\varphi) = \begin{pmatrix} R \cdot \cos(\varphi) \\ R \cdot \cos(\Theta) \cdot \sin(\varphi) \\ R \cdot \sin(\Theta) \cdot \sin(\varphi) \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Для получения уравнений многопериодной центральной кривой (окружность рассматриваем как однопериодную) необходимо на матрицу C_1 воздействовать оператором поворота относительно оси Oz с углом φ . Но при этом следует учесть, что исследуемая точка, принадлежащая окружности (центр тела качения), при повороте данной окружности на некоторый угол φ_1 должна в относительном дви-

жении перемещаться в обратном направлении так, чтобы в абсолютном движении поворот происходил на угол $\varphi_2 = \varphi_1 / i_{12}$, где i_{12} – передаточное отношение двухзвенного механизма, где 1 – ведущее звено – сателлит, содержащее ряд роликов, другое звено 2 имеет беговую дорожку. Таким образом,

$$\varphi_r = \varphi_2 - \varphi_1 = -\left(1 - \frac{1}{i_{12}}\right). \quad (7)$$

Следовательно, необходимые уравнения будут получены после выполнения математической операции

$$C_2(\varphi, i_{12}, \Theta) = M(0, 0, 1, \varphi) \times C_1\left(-\left(1 - \frac{1}{i_{12}}\right) \cdot \varphi, \Theta\right). \quad (8)$$

В результате имеем следующие зависимости для координат:

$$C_2(\varphi, i_{12}, \Theta) = \begin{pmatrix} R \cdot \cos\left(\varphi \cdot \left(\frac{1}{i_{12}} - 1\right)\right) \cdot \cos(\varphi) - R \cdot \sin\left(\varphi \cdot \left(\frac{1}{i_{12}} - 1\right)\right) \cdot \cos(\Theta) \cdot \sin(\varphi) \\ R \cdot \cos\left(\varphi \cdot \left(\frac{1}{i_{12}} - 1\right)\right) \cdot \sin(\varphi) - R \cdot \sin\left(\varphi \cdot \left(\frac{1}{i_{12}} - 1\right)\right) \cdot \cos(\Theta) \cdot \cos(\varphi) \\ R \cdot \sin\left(\varphi \cdot \left(\frac{1}{i_{12}} - 1\right)\right) \cdot \sin(\Theta) \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Построенная по параметрическим уравнениям (9) кривая будет лишь фрагментом многопериодной центральной кривой, полученной при вращении ведущего

вала на угол 2π . Для вывода уравнений замкнутой кривой необходимо в уравнениях (9) заменить угол φ на выражение $\varphi \cdot i_{12}$ для того, чтобы ведомое звено



сделало полный оборот относительно оси передачи при числе оборотов ведущего звена, равном передаточному отношению i_{12} . После этой подстановки и замены передаточного отношения на число периодов ($i_{12} = 1 + Z_3$) [7] окончательно имеем

$$x(\varphi) = R \cdot (\cos(Z_3 \cdot \varphi) \cdot \cos((Z_3 + 1) \cdot \varphi) + \sin(Z_3 \cdot \varphi) \cdot \sin((Z_3 + 1) \cdot \varphi) \cdot \cos(\Theta)); \quad (10)$$

$$y(\varphi) = R \cdot (\cos(Z_3 \cdot \varphi) \cdot \sin((Z_3 + 1) \cdot \varphi) - \sin(Z_3 \cdot \varphi) \cdot \cos((Z_3 + 1) \cdot \varphi) \cdot \cos(\Theta)); \quad (11)$$

$$z(\varphi) = R \cdot \sin(Z_3 \cdot \varphi) \cdot \sin(\Theta). \quad (12)$$

Полученная по уравнениям (10)–(12) траектория 2 на рис. 3 показана штриховой линией. Начальная точка траектории M' (при угле $\varphi = 0$) совпадает с одной из вершин центральной кривой и лежит вне тела заготовки.

Важным аспектом в изготовлении беговой дорожки является соотношение диаметров рабочей части фрезы и хвостовика. У концевых фрез (см. рис. 2, б) они равны или незначительно отличаются. Из-за наличия вертикальной подачи происходит срезание отдельных «нависающих» участков, которые при компьютерном моделировании последовательного вычитания объема, формируемого при прохождении шарика по траекториям (см. рис. 4), присутствуют.

Это приводит к уменьшению рабочих участков беговых дорожек и дополнительному снижению нагрузочной способности передачи [8].

Избежать погрешностей профиля позволит горизонтальное расположение оси фрезы при обработке. Однако для его использования на имеющемся оборудовании необходимо проектировать специальное приспособление. Размеры отверстия в заготовке при этом должны позволять размещение фрезы.

Заключение

Получены параметрические уравнения траектории движения центра рабочей части сферической фрезы с начальной точкой, расположенной таким образом, чтобы фреза в начале каждого из проходов не контактировала с заготовкой при изготовлении кулачков сферических роликовых передач. Это позволит избежать дефектов кулачкового профиля при его изготовлении на фрезерном станке с ЧПУ.

Наиболее перспективным является применение аддитивных технологий, позволяющих полностью избежать дефектов профиля. Однако в настоящее время такое решение не всегда экономически обоснованно, т. к. детали из металлических материалов с необходимой степенью точности могут быть изготовлены на высокоточных 3D-принтерах, имеющих высокую стоимость.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лустенков, М. Е. Сферическая роликовая передача с двухрядным сателлитом: силовые расчеты и определение КПД / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. – 2019. – № 5. – С. 32–43.
2. Планетарные передачи: справочник / Под ред. В. Н. Кудрявцева, Ю. Н. Кирдяшева. – Ленинград: Машиностроение, 1977. – 536 с.
3. Лустенков, М. Е. Оценка кинематических возможностей и КПД сферической и роликовой передач / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова // Вестн. машиностроения. – 2019. – № 3. – С. 25–28.
4. Лустенков, М. Е. Расчет геометрии адаптированного профиля эллипсной шариковой передачи / М. Е. Лустенков // Технология машиностроения. – 2005. – № 5. – С. 36–38.



5. Технологические аспекты создания рабочих поверхностей передач новых типов: [монография] / П. Н. Громыко, М. Е. Лустенков, С. Н. Хатетовский, Л. Г. Доконов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – 209 с.

6. **Лустенков, М. Е.** Расчет и проектирование сферических роликовых передач: [монография] / М. Е. Лустенков, Е. С. Лустенкова. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 177 с.

7. **Лустенков, М. Е.** Механизм с изменяющимся углом между осями валов / М. Е. Лустенков, Е. С. Фитцова // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. – 2014. – № 1. – С. 46–50.

8. **Lustenkov, M. E.** Strength calculations for cylindrical transmissions with compound intermediate rolling elements / М. Е. Lustenkov // Int. J. of Mechanisms and Robotic Systems. – 2015. – Vol. 2, No 2. – P. 111–121.

Статья сдана в редакцию 8 июля 2019 года

Екатерина Сергеевна Лустенкова, ассистент, Белорусско-Российский университет.
E-mail: fittsova@gmail.com.

Ekaterina Sergeyevna Lustenkova, assistant lecturer, Belarusian-Russian University.
E-mail: fittsova@gmail.com.

