

УДК 621.81.004

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ВИНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГЛОБОИДНОГО ЧЕРВЯКА РОТАЦИОННЫМ ТОЧЕНИЕМ ПРИНУДИТЕЛЬНО ВРАЩАЕМЫМ МНОГОЛЕЗВИЙНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Сутягин А.В., Малько Л.С., Трифанов И.В.

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, e-mail: sibgau-uks@mail.ru

Показана актуальность задачи повышения эффективности технологии зубообработки глобоидной передачи. Предложена технология ротационного точения принудительно вращаемым многолезвийным инструментом для устранения недостатков, присущих существующей технологии обработки винтовой поверхности глобоидного червяка. Показана схема движений при формировании винтовой поверхности глобоидного червяка. Обосновано повышение производительности на черновой операции, при применении ротационного точения принудительно вращаемым многолезвийным инструментом в сравнении с существующей в настоящее время технологией. Представлена математическая модель и порядок проведения численного эксперимента по исследованию процесса формирования профиля винтовой поверхности глобоидного червяка ротационным точением и результаты его реализации средствами Matlab. Сделаны выводы о том, что применение ротационного точения является одним из эффективных направлений совершенствования технологии зубообработки глобоидной пары.

Ключевые слова: математическая модель, ротационное точение, многолезвийный инструмент, глобоидный червяк, винтовая поверхность

MODEL FORMATION SCREW SURFACE HOUR-GLASS WORM ROTATIONAL SHARPEN FORCIBLY ROTATED MULTIFLUTED TOOL

Sutyagin A.V., Malko L.S., Trifanov I.V.

Siberian state aerospace university name of academician M.F. Reshetnev, Krasnoyarsk, e-mail: sibgau-uks@mail.ru

Relevance a problem increase efficiency technology gear treatment hour-glass worm. The technology rotational sharpening by forcibly rotated multiblade tool for elimination of shortcomings inherent in existing technology of processing of a screw surface of a hour-glass worm is offered. The scheme movements is shown when forming a screw surface hour-glass worm. Productivity increase, on draft operation is proved, at application rotational sharpen by forcibly rotated multiblade tool in comparison with technology existing now. The mathematical model and order carrying out numerical experiment on research process formation profile screw surface hour-glass worm by rotational sharpen and results realization is presented by Matlab. Conclusions that application of rotational sharpening is one the effective directions of improvement of technology gear treatment hour-glass couple are drawn.

Keywords: mathematical model, rotational sharpen, multibladed tool, hour-glass worm, screw surface

Глобоидные червячные передачи по сравнению с цилиндрическими червячными передачами имеют преимущества как по нагрузочной способности и коэффициенту полезного действия, так и по массогабаритным характеристикам [1, 2]. Уменьшение массы глобоидного редуктора может быть в 5–8 раз по сравнению с цилиндрическим редуктором, передающим одинаковую нагрузку [3]. В связи с отмеченным глобоидные передачи применяются в механизмах техники оборонного и специального назначения [1].

Однако традиционная технология изготовления деталей глобоидных пар в настоящее время является трудоемкой. Наиболее сложным является конструктивное исполнение режущего инструмента для обработки винтовой поверхности глобоидного червяка. Диаметральные размеры его совпадают с диаметрными размерами сопряженного червячного колеса глобоидной пары и определяются по формуле

$$d_{au} = d_2 + 2h \cdot m, \quad (1)$$

где d_{au} – наружный диаметр сборного режущего инструмента, мм; d_2 – диаметр делительной окружности червячного колеса, мм; h – коэффициент высоты делительной ножки витка червяка.

Кроме того, изготовление деталей глобоидной передачи по известной технологии обладает низкой производительностью и высокой трудоемкостью, в том числе при сборке. В связи с этим необходимо изыскание более рациональной технологии изготовления деталей глобоидной пары.

Одним из эффективных путей решения этой задачи является применение технологии ротационного точения винтовой поверхности глобоидного червяка принудительно вращаемым многолезвийным инструментом с эвольвентным профилем [4].

Использование ротационного точения позволяет рационализировать конструкцию технологического оборудования для обработки винтовой поверхности глобоидного червяка за счет исключения из кинематической цепи делительной червячной пары. Это существен-

но уменьшает его габаритомассовые характеристики, а также скажется на увеличении крутильной жесткости кинематической цепи. В зависимости от типа производства это могут быть устройства для ротационного точения винтовой поверхности на бездифференциальной основе, интегрированные с токарно-винторезными станками [5, 6], или сугубо специальные станки с более рациональной кинематической и компоновочной схемами.

С целью подтверждения выдвинутой гипотезы о возможности применения ротационного точения винтовой поверхности глобоидного червяка многолезвийным инструментом с эвольвентным профилем разработана модель и выполнен численный эксперимент по формированию профиля винтовой поверхности глобоидного червяка данным способом.

Схема элементарных движений при формообразовании винтовой поверхности глобоидного червяка ротационным точением принудительно вращаемым многолезвийным инструментом показана на рис. 1.

Математическая модель формирования профиля винтовой поверхности глобоидного червяка включает в себя следующий алгоритм вычислений.

1. Расчет геометрических параметров многолезвийного инструмента, включающий расчет минимально допустимого числа режущих элементов инструмента, позволяющих избежать явления подреза профиля червяка при его формировании [7].

2. Расчет координат профиля многолезвийного инструмента.

3. Расчет числа резов при формировании профиля винтовой поверхности глобоидного червяка ротационным точением в зависимости от продольной подачи инструмента.

4. Расчет координат последовательного положения базовых точек, расположенных на профиле режущего инструмента.

5. Расчет максимальной толщины срезаемого слоя припуска вершиной режущего элемента инструмента в зависимости от продольной подачи инструмента и порядкового номера реза в проекции на ось y .

При разработке математической модели формообразования профиля винтовой поверхности глобоидного червяка необходимо иметь в аналитической форме выражения для координат профиля режущего элемента инструмента как для эвольвентного участка, так и его нерабочей переходной части.

В нашем исследовании для расчета профиля режущих элементов инструмента

мы воспользовались прямоугольной системой координат, при которой ось y расположена симметрично относительно профиля режущего элемента и с началом координат на окружности впадин, а также вспомогательной системой координат $x_0o_0y_0$ с осью y_0 , проходящей через точку III пересечения профиля инструмента с делительной окружностью, и с началом координат в O_u – центре инструмента. Делительная окружность совпадает с центроидой инструмента. При этом также использовались математические выражения, приведенные в работе [8]. Схема расположения прямоугольной системы координат относительно профиля режущего элемента представлена на рис. 2.

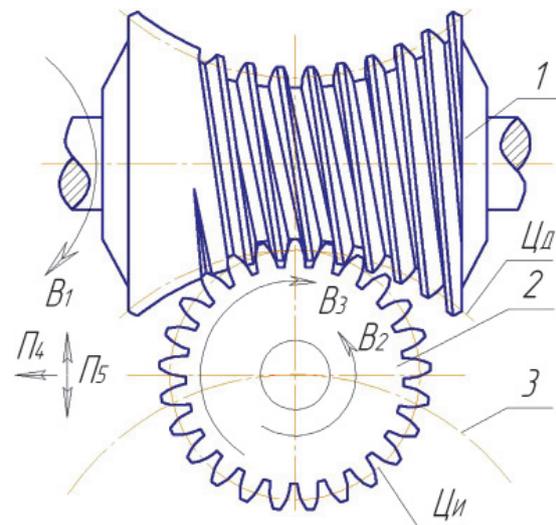


Рис. 1. Схема распределения элементарных движений при формообразовании винтовой поверхности глобоидного червяка ротационным точением принудительно вращаемым многолезвийным инструментом:
1 – заготовка глобоидного червяка;
2 – многолезвийный инструмент;
3 – траектория движения оси инструмента, эквидистантная C_{D1} , C_{D2} – центроиды глобоидного червяка, C_{I1} – центроид многолезвийного инструмента; B_1 – движение червяка в форме вращения; B_2 и B_3 – движения инструмента в форме вращения, суммируемые на его оси; P_4 – движение инструмента вдоль оси детали в поступательной форме; P_5 – движение инструмента в направлении, перпендикулярном к продольной оси детали

Уравнение эвольвенты профиля режущего элемента в принятой системе координат имеет вид (2) [8]:

$$\begin{aligned} x_s &= r \left[\sin(\phi - \phi_s) - \phi \cdot \cos \alpha \cdot \cos(\phi - \phi_s + \alpha) \right]; \\ y_s &= r \left[\cos(\phi - \phi_s) + \phi \cdot \cos \alpha \cdot \sin(\phi - \phi_s + \alpha) \right] - R_f, \end{aligned} \quad (2)$$

где ϕ – текущий параметр, соответствующий углу обкатки при нарезании зубьев многолезвийного инструмента червячной фрезой. Значение текущего параметра ϕ для фиксирующих точек II, III и IV эвольвентной части профиля (рис. 2) определяется из выражения вида (3) [8]:

$$\phi_{II} = -\frac{H'}{r \sin \alpha \cdot \cos \alpha};$$

$$\left\{ -\frac{180^\circ \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\pi}; \frac{180^\circ}{\pi} \left[\operatorname{tg} \left(\arccos \frac{r \cdot \cos \alpha}{r_a} \right) - \operatorname{tg} \alpha \right] \right\}, \quad (4)$$

где ϕ_s – половина угловой толщины зуба инструмента, определяемая из выражения вида

$$\phi_s = \frac{\pi}{2z}, \quad (5)$$

$$x_n = -(H' \cdot \operatorname{tg} \alpha + \sigma_0 \cdot \cos \alpha - \sigma_0 \cdot \cos \psi + r\phi) \cdot \cos(\phi - \phi_s) + (-H' - \sigma_0 \cdot \sin \psi + r) \cdot \sin(\phi - \phi_s); \quad (6)$$

$$y_n = (H' \cdot \operatorname{tg} \alpha + \sigma_0 \cdot \cos \alpha - \sigma_0 \cdot \cos \psi + r\phi) \cdot \sin(\phi - \phi_s) + (-H'' - \sigma_0 \cdot \sin \psi + r) \cdot \cos(\phi - \phi_s) - R_i,$$

где $\sigma_0 = \frac{0,25m}{1 - \sin \alpha}$ – значение текущего па-

раметра ϕ для точки I переходной части профиля зуба режущего элемента в принятой системе координат (рис. 2) имеет вид (7):

$$\phi_I = -\frac{H' \cdot \operatorname{tg} \alpha + \sigma_0 \cdot \cos \alpha}{r}. \quad (7)$$

С учетом зависимостей для текущего параметра в фиксированных точках I и II профиля получено выражение для изменения текущего параметра ϕ при формировании переходной части профиля вида

$$\left[-\frac{180^\circ}{\pi} \cdot \frac{H' \cdot \operatorname{tg} \alpha + \sigma_0 \cdot \cos \alpha}{r}; -\frac{180^\circ}{\pi} \cdot \frac{H'}{r \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha} \right]. \quad (8)$$

Расчет значений текущего параметра ϕ в зависимости от продольной подачи S многолезвийного инструмента и порядкового номера i координат последовательного положения базовых точек на режущем элементе инструмента (порядкового номера реза) выполняется по зависимости вида

$$\phi = \arcsin \frac{S \cdot i}{R - r}. \quad (9)$$

Из анализа схемы движений (рис. 1) при формообразовании винтовой поверхности глобоидного червяка ротационным течением следует, что если одно из звеньев глобоидной пары (червяк) считать неподвижным, то центроида инструмента в форме окружности

перекатывается без скольжения по неподвижной центроиде детали. В этом случае, траектория точек, лежащих на центроиде инструмента, а также точек, лежащих вне центроиды, но жестко связанных с ней, могут быть описаны уравнениями гипоциклоидальных кривых. Поэтому руководствуясь методикой определения сопряженных профилей по двум фиксирующим точкам [9], выбираем одну базовую точку A на режущем элементе, на пересечении его оси симметрии с центроидой инструмента, а вторую B – с окружностью выступов, и рассчитываем координаты их последовательного положения в зависимости от продольной подачи и порядкового номера реза по уравнениям гипоциклоидальных кривых.

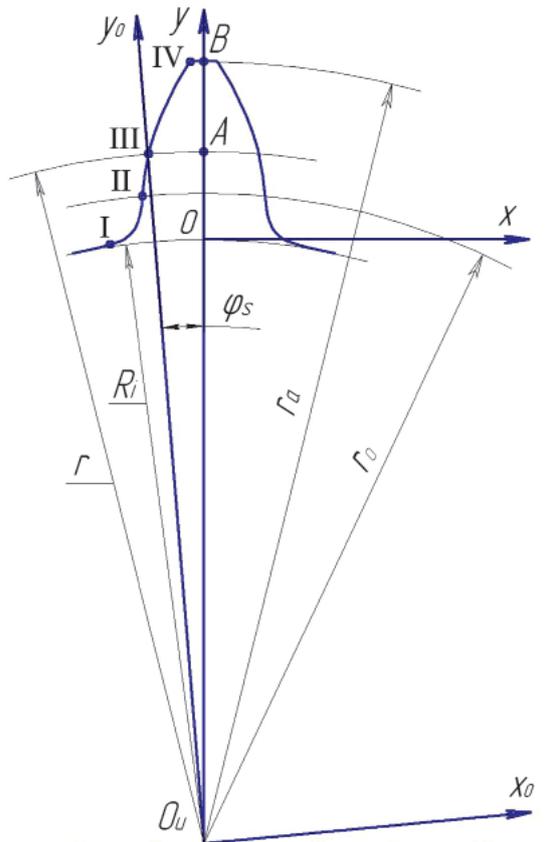


Рис. 2. Схема расположения прямоугольной системы координат x_0y_0 относительно профиля режущего элемента:

I, II, III и IV точки на эвольвентной и переходной частях профиля; R_i – радиус окружности впадин инструмента; r_a – радиус окружности выступов инструмента; r – радиус центроиды инструмента; ϕ_s – половина угловой толщины зуба инструмента на окружности, совпадающая с центроидой радиуса r

Траектории движения базовых точек A и B описываются уравнениями нормальной (10) и удлиненной (11) гипоциклоидой соответственно:

$$x_A = (R - r) \cdot \cos \phi + r \cdot \cos \left(\frac{R - r}{r} \cdot \phi \right); \quad (10)$$

$$y_A = (R - r) \cdot \sin \phi - r \cdot \sin \left(\frac{R - r}{r} \cdot \phi \right).$$

$$x_B = (R - r) \cdot \cos \phi + h_{a1} \cdot \cos \left(\frac{R - r}{r} \cdot \phi \right); \quad (11)$$

$$y_B = (R - r) \cdot \sin \phi - h_{a1} \cdot \sin \left(\frac{R - r}{r} \cdot \phi \right),$$

где h_{a1} – высота делительной головки глобоидного червяка.

Расчет максимальной толщины срезаемого слоя припуска при формировании профиля винтовой поверхности глобоидного червяка вершиной режущего элемента многолезвийного инструмента в зависимости от продольной подачи инструмента и порядкового номера реза в проекции на ось y выполняется по зависимости

$$\Delta_i = y_{Bi} - y_{Bi-1}, \quad (12)$$

где y_{bi} и y_{bi-1} – координаты базовой точки B на двух последовательных резах.

Разработанная математическая модель позволяет осуществлять проведение численного эксперимента по исследованию процесса формирования винтовой поверхности глобоидного червяка ротационным точением.

Представление о характере изменения и форме срезаемого припуска, а также о нагрузке режущих кромок инструмента необходимы для выбора рациональной подачи и оценки эффективности процесса ротационного точения в целом.

На рис. 3 представлены результаты численного эксперимента, выполненного в среде MATLAB согласно разработанному алгоритму.

Оценку производительности срезания припуска при черновой обработке винтовой поверхности глобоидного червяка ротационным точением принудительно вращаемым многолезвийным инструментом выполняли путем сравнения основного времени ротационного точения с основным временем обработки трехрезцовой головкой по существующей технологии применительно к обработке винтовой поверхности глобоидного червяка модулем 10 мм, для глобоидной передачи с характеристиками: модуль 10 мм, межосевое расстояние 500 мм, передаточное отношение 80, число зубьев червячного колеса 80.

При определении численного значения машинного времени при ротационном точении величину подачи принимали равной $S = 1,5$ мм/об, число проходов при срезании припуска принимали $i = 6$, число оборотов шпинделя при срезании припуска принимали равным $n = 30$ об/мин (число оборотов определяется с учетом скорости резания 20–35 м/мин), число оборотов шпинделя при обратных ходах принимали равным $n = 66$ об/мин. Значение режимов резания было принято с учетом данных работы [10] и результатов численного эксперимента (рис. 3). При этом машинное время обработки на черновой операции составило 81 мин.

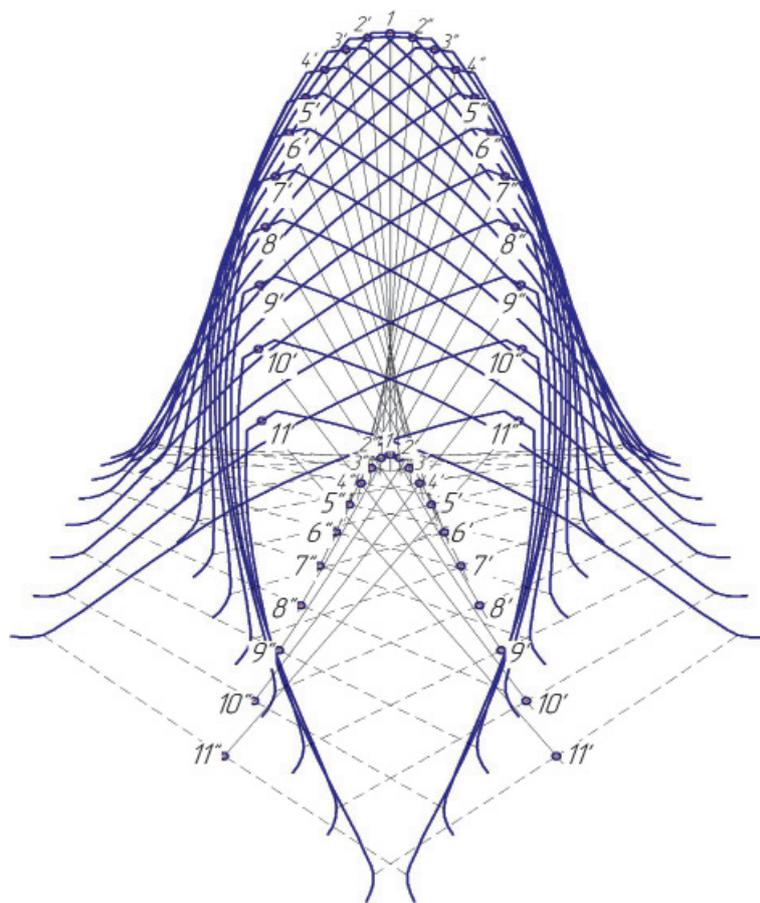


Рис. 3. Модель срезаания припуска при формировании профиля винтовой поверхности глобоидного червяка ротационным точением многолезвийным инструментом: 11'-11'...2'-2' положение профиля режущего элемента инструмента при входе, 1-1 верхнее положение профиля режущего элемента, 2'-2'...11'-11" положение режущего элемента инструмента при выходе из впадины профиля глобоидного червяка

Расчет основного времени обработки по существующей технологии методом радиальной подачи выполнены по формуле вида [11]

$$T_M = \frac{(h + y) \cdot z_2}{S_p \cdot n_r \cdot z_1}, \quad (13)$$

где S_p – радиальная подача, мм; h – высота зуба нарезаемого червяка; z_1 – число заходов червяка; z_2 – число зубьев червячного колеса глобоидной передачи; y – величина врезания, мм; n_r – число оборотов червяка, мин.

Режимы были выбраны по данным работы [12]. При этом машинное время обработки винтовой поверхности глобоидного червяка на черновой операции составило 307 мин.

В результате исследования процесса формирования профиля винтовой поверхности глобоидного червяка на основе численного эксперимента установлено следующее:

1. Срезаемый слой припуска имеет сложную форму при переменной толщине как в пределах одного реза, так и от реза к резу.

2. Вследствие сложной формы срезаемого слоя имеет место несвободное резание.

3. Основная масса припуска срезается вершиной и входной боковой стороной режущей кромки зуба инструмента.

4. Максимальную толщину имеет срезаемый слой вершиной режущего элемента инструмента.

5. Толщина срезаемого слоя припуска, снимаемого различными участками режущей кромки инструмента, имеет большие значения в начале удаления припуска из впадины витка и меньшие в конце формирования впадины.

6. Обработку ротационным точением винтовой поверхности глобоидного червяка можно осуществлять при продольной подаче инструмента до 2 мм на оборот. При этом толщина срезаемого слоя вершиной режущего элемента на первых резах не превышает 0,5 мм, что вполне приемлемо из условия обеспечения работоспособности режущей кромки.

7. Повышение производительности процесса на черновой операции может составлять до 3,8 раз, по сравнению с обработкой трехрезцовой головкой по существующему варианту технологии. При этом процесс является многопроходным. Глубина резания на первых проходах составляет 3 мм с увеличением на последующих до 6 мм.

Анализ полученных результатов расчета показывает, что применение ротационного точения обеспечивает повышение производительности процесса обработки по машинному времени в сравнении с применяемой в настоящее время обработкой трехрезцовой головкой в 3,8 раза. Полученные результаты исследования процесса формирования профиля глобоидного червяка на основе численного эксперимента имеют важное значение для подтверждения вывода о том, что применение ротационного точения является одним из эффективных направлений совершенствования технологии обработки червячной пары глобоидной передачи.

Список литературы

1. Сандлер А.И., Лагутин С.А., Верховский А.В. Производство червячных передач / под общ. ред. С.А. Лагутина. – М.: Машиностроение, 2008. – 272 с.
2. Парубец В.И. Глобоидные передачи: состояние, тенденции и перспективы развития научно-технических исследований и разработок в России // Редукторы и приводы. – 2005. – № 2, 3 (02). – С. 52–58.
3. Дикер Я.И. Глобоидные передачи // Вестник машиностроения. – 1947. – № 3. – С. 10–22.
4. Технология ротационного точения винтовых поверхностей деталей машин принудительно вращаемым многолезвийным инструментом: монография / И.В. Трифанов, Л.С. Малько, А.В. Сутягин. – Красноярск: СибГАУ, 2013. – 116 с.
5. Пат. 2253545. РФ. МПК В23В5/48. Устройство к токарному станку для обработки винтовой поверхности Л.С. Малько. Оpubл. 10.06.2005. Бюл. № 16.
6. Сутягин А.В. Устройство для ротационной обработки винтовой поверхности глобоидных червяков / А.В. Сутягин, Ю.В. Сутягина, Л.С. Малько, И.В. Трифанов // Решетневские чтения : материалы XVI междунар. науч. конф. в 2 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2012. – Ч. 1. – 458 с.
7. Гавриленко В.А. Основы теории эвольвентной зубчатой передачи. – М.: Машиностроение, 1969. – 432 с.
8. Колчин Н.И. Механика машин. в 2-х т. – Т1. – Л.: Машиностроение. 1971. – С. 560.
9. Шишков В.А. Образование поверхности резания по методу обкатки – М.: Mashgiz, 1951. – 152 с.
10. Сутягин А.В. Технологические особенности многолезвийной обработки винтовых поверхностей ротационным

точением / А.В. Сутягин, Л.С. Малько, И.В. Трифанов // Вестник СибГАУ. – 2011. – Вып. 3 (36) – С. 156–161.

11. Производство зубчатых колес / под ред. Б.А. Тайца. – М.: Машиностроение 1975. – 708 с.

12. Журавлев В.Л. Технология изготовления глобоидных передач. – М.: Машиностроение 1965. – 151 с.

References

1. Sandler A.I., Lagutin S.A., Verhovskij A.V. Proizvodstvo chervjachnyh peredach (Production screw-gear) Moscow, Mashinostroenie, 2008. 272 p.
2. Parubec V.I. Reduktory i privody no. 2, 3 (02) 2005 pp. 52–58.
3. Diker Ja.I. Vestnik mashinostroeniya no. 3 1947 pp.10–22.
4. Tehnologija rotacionnogo tochenija vintovyh poverhnostej detalej mashin prinuditel'no vrashhaemym mnogolezviynym instrumentom: monografija (Technology of rotational turning of screw surfaces of details of cars forcibly rotated mnogolezviynny tool) / Trifanov I.V., Mal'ko L.S., Sutjagin A.V. SibGAU. Krasnojarsk, 2013. 116 p.
5. Pat. 2253545. RF. MPK V23V5/48. Ustrojstvo k tokarnomu stanku dlja obrabotki vintovoj poverhnosti L.S. Mal'ko. Opubl. 10.06.2005. Bjul. no. 16.
6. Sutjagin A.V., Sutjagina Ju.V., Malko L.S., Trifanov I.V. The device for rotational processing screw surface hour-glass worms [Ustrojstvo dlja rotacionnoj obrabotki vintovoj poverhnosti globoidnyh chervjakov] (Reshetnevskie chtenija: materialy XVI mezhdunar. nauch. konf. v 2 ch.) Krasnojarsk, 2012. Ch. 1. 458 p.
7. Gavrilenko V.A. Osnovy teorii jevol'ventnoj zubchatoj peredachi (Bases theory evolvent tooth gearing) Moscow, Mashinostroenie, 1969. 432 p
8. Kolchin N.I. Mehanika mashin (Mechanical engineering), Moscow, Mashinostroenie. 1971. 560 p.
9. Shishkov V.A. Obrazovanie poverhnosti rezanija po metodu obkatki (Formation surface cutting on a running in method) Moscow, Mashgiz, 1951. 152 p.
10. Sutjagin A.V., Malko L.S., Trifanov I.V. Vestnik SibGAU, 2011 no. 3 (36) pp. 156–161.
11. Proizvodstvo zubchatyh koles. Pod.red B.A. Tajca. M.: Mashinostroenie 1975 708 p.
12. Zhuravlev V.L. Tehnologija izgotovlenija globoidnyh peredach. M.: Mashinostroenie 1965. 151 p.

Рецензенты:

Ереско Т.Т., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Основы конструирования машин», ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск;

Беляев С.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой литейного производства, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Работа поступила в редакцию 04.06.2014.