
УДК 621.83.06

А. В. Капитонов

**ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ С МНОГОПЕРИОДНЫМИ
ДОРОЖКАМИ ПЛАНЕТАРНЫХ ШАРИКОВЫХ И РОЛИКОВЫХ ПЕРЕДАЧ**

UDC 621.83.06

A. V. Kapitonov

**THE ACCURACY OF MACHINING THE PLANETARY BALL AND ROLLER
GEARING PARTS WITH MULTI-PERIOD TRACKS**

Аннотация

Представлена методика расчета точности обработки деталей с многопериодными дорожками планетарных шариковых и роликовых передач, позволяющая рассчитать наиболее значимые элементарные погрешности, определить суммарную погрешность обработки, провести гармонический анализ функции накопленной погрешности шага многопериодной дорожки, оценить погрешность формы ее профиля.

Ключевые слова:

точности обработки, элементарные погрешности, гармонический анализ, накопленная погрешность шага.

Abstract

The methods of calculating the machining accuracy of parts of planetary ball and roller gearings having multi-period tracks are presented, which allow calculating the most important elementary inaccuracies, determining overall machining errors, performing harmonic analysis of the function of accumulated inaccuracy of the pitch of the multi-period track, estimating the inaccuracy of its profile form.

Key words:

machining accuracy, elementary inaccuracies, harmonic analysis, accumulated pitch inaccuracy.

Современная промышленность нуждается в малогабаритных механических приводах, имеющих большие передаточные отношения. Приводы, разработанные на основе зубчатых передач, не всегда могут отвечать требованиям обеспечения низких массогабаритных показателей, приемлемой стоимости и невысокой трудоемкости изготовления. Поэтому в настоящее время все больше используют в приводах общего машиностроения малогабаритные передачи, например, такие как планетарные шариковые или роликовые.

Обладая такими достоинствами, как обеспечение больших передаточных отношений в одной ступени, малыми

габаритами, невысокой стоимостью, эти передачи имеют такие недостатки, как низкий ресурс работы и невысокая надежность, что в наибольшей степени связано с низкой точностью их изготовления.

Поэтому с целью повышения надежности и долговечности этих передач применяются методы оценки точности обработки основных деталей с многопериодными дорожками, разрабатываются технологии изготовления основных деталей, технологии обработки этих деталей на отделочных операциях и методы их контроля.

В планетарной шариковой или роликовой передаче [1] зацепление осу-

ществляется перемещением сателлита (шарика или ролика) по многопериодной дорожке диска, которая образована фрезой, перемещающейся по периодической кривой, замкнутой на плоскости, описываемой уравнением смещенной окружности

$$\rho = \sqrt{R^2 - A^2 \sin^2 z_2 \varphi} + A \cos z_2 \varphi, \quad (1)$$

где A – амплитуда периодической кривой; R – радиус средней окружности; z_2 – число периодов.

Многопериодная дорожка может быть образована замкнутой на плоскости синусоидой, которая в полярных координатах имеет вид:

$$\rho = R_0 + A(1 + \sin z_2 \varphi), \quad (2)$$

где R_0 – минимальный радиус; A – амплитуда периодической дорожки; z_2 – число периодов дорожки.

В прямоугольных координатах уравнения периодической дорожки, замкнутой на плоскости синусоиды, имеют вид:

$$y = (R_0 + A(1 + \sin z_2 \varphi)) \sin \varphi; \quad (3)$$

$$x = (R_0 + A(1 + \sin z_2 \varphi)) \cos \varphi. \quad (4)$$

На рис. 1 показана 3D-модель диска с многопериодной дорожкой. На рис. 2 показаны геометрические параметры многопериодной дорожки с числом периодов $z_2 = 10$, амплитудой $A = 10$ мм, средним радиусом $R = 60$ мм, угловым шагом $\varphi_n = 360/z_2$.

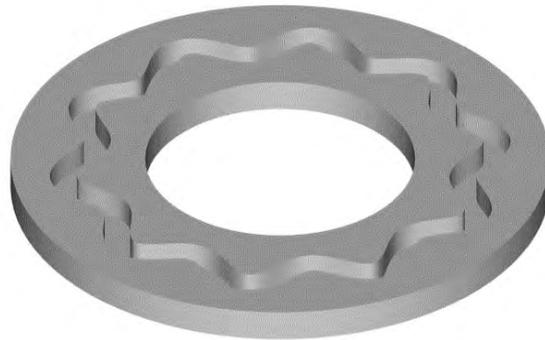


Рис. 1. Диск с многопериодной дорожкой

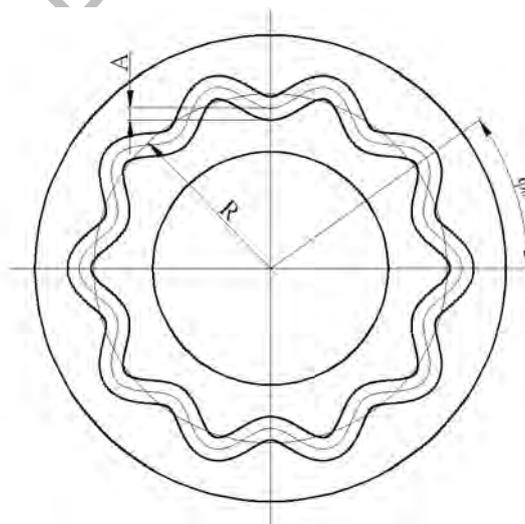


Рис. 2. Геометрические параметры многопериодной дорожки

Для обеспечения точности изготовления деталей с многопериодными дорожками использована методика расчета суммарной погрешности обработки, которая позволяет определить и рассчитать основные погрешности при обработке дисков, а также управлять этими погрешностями на стадии проектирования технологических операций.

Исследуемый параметр детали представляет собой функцию нескольких переменных $Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$. Для расчета абсолютной погрешности выходного параметра используем выражение [2]

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)_{\bar{X}_i} \Delta_i, \quad (5)$$

где Δ_i – абсолютная погрешность параметров функции; \bar{X}_i – индексы при частных производных.

Значения производных при X_i равны среднему значению \bar{X}_i (идеальному, номинальному значению). Отношение $\partial f / \partial X_i = S_i$ – это абсолютная чувствительность функции к изменению параметра или передаточное отношение.

Используя вероятностный метод расчета, рассмотрим погрешности как случайные величины. Суммарная погрешность обработки профиля многопериодной дорожки состоит из элементарных случайных погрешностей. Суммарную погрешность можно определить по формуле

$$\Delta_z = \frac{1}{K} \sqrt{\sum_{i=1}^n (K_i S_i \Delta_i)^2}, \quad (6)$$

где Δ_i – элементарные погрешности обработки случайного характера; K_i – коэффициент относительного рассеяния, характеризующий отношение поля рассеяния погрешности при нормальном законе распределения к действительному полю рассеяния.

Коэффициент $1/K$ принимается в зависимости от заданной гарантирован-

ной надежности.

На точность формообразования многопериодной дорожки в наибольшей степени будут влиять погрешности базирования дисков в приспособлении, погрешности от износа фрезы и неточности станков с ЧПУ, на которых проводится обработка.

При определении погрешности базирования возьмем за основу методику, согласно которой обрабатываемая поверхность будет смещена и повернута относительно выбранной системы координат [3, 4]. При расчете погрешностей и определении координат точек обрабатываемых поверхностей будем рассматривать систему координат станка $x_0 y_0 z_0$ и систему координат детали $X_1 Y_1 Z_1$.

Если деталь повернута и смещена относительно системы координат $X_0 Y_0 Z_0$ и известны координаты любой точки детали в системе $X_1 Y_1 Z_1$, то координаты детали в системе $X_0 Y_0 Z_0$ определяются вектором $\varepsilon_{\partial.cm.}$ смещений и вектором $\sigma(\varphi, \psi, \theta)$ по формуле

$$\begin{pmatrix} \Delta_{x1} \\ \Delta_{y1} \\ \Delta_{z1} \end{pmatrix} = \pi \begin{pmatrix} \varepsilon_{\partial x0} \\ \varepsilon_{\partial y0} \\ \varepsilon_{\partial z0} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где $\varepsilon_{\partial.cm.}(\varepsilon_{\partial x0}, \varepsilon_{\partial y0}, \varepsilon_{\partial z0})$ – вектор смещений детали относительно системы координат станка; π – матрица преобразования пространства, состоящего в его последовательных поворотах на углы φ, ψ и θ вокруг координатных осей X_0, Y_0 и Z_0 соответственно.

Вектор смещений можно представить векторной суммой, т. е.

$$\varepsilon_{\partial.cm.} = \varepsilon_{n.cm.} + \varepsilon_{\partial.n.}, \quad (8)$$

где $\varepsilon_{n.cm.}(\varepsilon_{nx0}, \varepsilon_{ny0}, \varepsilon_{nz0})$ – вектор смещений приспособления относительно системы координат станка; $\varepsilon_{\partial.n.}(\varepsilon_{\partial x}, \varepsilon_{\partial y}, \varepsilon_{\partial z})$ – вектор смещений детали относительно системы координат приспособления.

Приведенную векторную сумму смещения детали можно представить в координатной форме:

$$\varepsilon_{\partial x 0} = \varepsilon_{nx 0} + \varepsilon_{\partial x}; \quad (9)$$

$$\varepsilon_{\partial y 0} = \varepsilon_{ny 0} + \varepsilon_{\partial y}; \quad (10)$$

$$\varepsilon_{\partial z 0} = \varepsilon_{nz 0} + \varepsilon_{\partial z}. \quad (11)$$

Каждое из слагаемых $\varepsilon_{\partial x}$, $\varepsilon_{\partial y}$, $\varepsilon_{\partial z}$ в уравнениях (9)...(11) содержит составляющую погрешности базирования, обусловленную несовпадением технологической и измерительной баз детали, а также составляющую этой погрешности, связанную с относительным сме-

$$\pi = \begin{vmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \varphi \sin \psi \cos \theta + \cos \varphi \sin \theta & -\cos \varphi \sin \psi \cos \theta + \sin \varphi \sin \theta \\ -\cos \psi \sin \theta & -\sin \varphi \sin \psi \sin \theta + \cos \varphi \cos \psi & \cos \varphi \sin \psi \sin \theta + \sin \varphi \cos \theta \\ \sin \psi & -\sin \varphi \cos \psi & \cos \varphi \cos \psi \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Она характеризуется малыми значениями углов поворота. Исключая из матрицы малые величины высших порядков малости, произведение синусов, получим

$$\pi = \begin{vmatrix} 1 & \theta & -\psi \\ -\theta & 1 & \varphi \\ \psi & -\varphi & 1 \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Выполнив формальные преобразования, получим формулы для расчета погрешностей базирования диска в направлении осей $X_1 Y_1 Z_1$:

$$\Delta_{x1} = \varepsilon_{x0} + \varepsilon_{y0}\gamma - \varepsilon_{z0}\beta; \quad (14)$$

$$\Delta_{y1} = \varepsilon_{y0} + \varepsilon_{x0}\gamma + \varepsilon_{z0}\alpha; \quad (15)$$

$$\Delta_{z1} = \varepsilon_{z0} + \varepsilon_{x0}\beta - \varepsilon_{y0}\alpha. \quad (16)$$

Можно решить и обратную задачу. Если, например, известны погрешности размеров детали в направлении осей X_1 , Y_1 и Z_1 , а также погрешности углового расположения обрабатываемых поверхностей относительно системы координат станка, то можно определить допустимые смещения заготовки при ее базировании в направлениях X_0 , Y_0 и Z_0 , при которых достигается заданная точность обработки. Расчет этих смещений следует вести по формуле

щением технологической базы в направлении выполняемого размера вследствие имеющих место погрешностей ее формы.

Углы поворота φ , ψ и θ определяются на основе погрешностей формы и расположения поверхностей заготовки и приспособления, использующихся в качестве технологических баз на рассматриваемой операции.

Матрица π имеет вид:

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_{\partial x 0} \\ \varepsilon_{\partial y 0} \\ \varepsilon_{\partial z 0} \end{vmatrix} = \pi^T \begin{vmatrix} \Delta_{x1} \\ \Delta_{y1} \\ \Delta_{z1} \end{vmatrix}, \quad (17)$$

где π^T – транспонированная матрица преобразования пространства $X_1 Y_1 Z_1$, состоящего в его поворотах вокруг осей X_0 , Y_0 и Z_0 на углы, определяемые вектором σ .

Выполнив формальные преобразования в соответствии с формулой (17), получим формулы для расчета погрешностей базирования в направлениях осей X_0 , Y_0 , Z_0 :

$$\varepsilon_{\partial x 0} = \Delta_{x1} - \Delta_{y1}\theta + \Delta_{z1}\psi; \quad (18)$$

$$\varepsilon_{\partial y 0} = \Delta_{y1} + \Delta_{x1}\theta - \Delta_{z1}\varphi; \quad (19)$$

$$\varepsilon_{\partial z 0} = \Delta_{z1} - \Delta_{x1}\psi + \Delta_{y1}\varphi. \quad (20)$$

Обработка дорожки выполняется фрезерованием на станках с ЧПУ концевой фрезой. Погрешность ширины канавки в основном зависит от систематических погрешностей, связанных с режущим инструментом. Эту погрешность можно рассчитать по формуле

$$\Delta_h = \left| \Delta_u \cdot n - \Delta_T - \Delta_{p.\delta} \right|, \quad (21)$$

где Δ_u – износ фрезы при обработке одной детали; n – число деталей, обработанных с одной заточки фрезы; Δ_T – увеличение диаметра фрезы из-за тепловых деформаций; $\Delta_{p.б.}$ – радиальное биение фрезы.

Ширину многопериодной дорожки уменьшает погрешность от износа фрезы, а нагрев и радиальное биение фрезы ее увеличивают.

Износ фрезы и путь резания определим по формулам [2]:

$$\Delta_u = \frac{u_0 L}{1000}; \quad (22)$$

$$L = \frac{\pi D l}{1000 S_0}, \quad (23)$$

где L – путь резания; u_0 – удельный износ; l – длина фрезерования; S_0 – подача на оборот; D – диаметр фрезы.

Длину фрезерования l определим следующим образом. Разобьем периодическую кривую многопериодной дорожки, по которой будет перемещаться ось фрезы на большое число дуг с равным угловым шагом. Соединив концы этих дуг, получим отрезки (хорды). Если принять большое число таких отрезков по всей периодической кривой и их сложить, то с заданной небольшой погрешностью можно получить длину дуги многопериодной кривой, которая и будет длиной фрезерования. Длина дуги периодической кривой была получена с помощью ПК. При этом кривая была разбита на такое количество хорд, что каждой хорде соответствовал угол, равный одной угловой секунде. При этом погрешность расчета длины дуги периодической кривой составила не более 0,001 мм.

Таким образом, путь резания можно определить по формулам:

$$d_j = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}; \quad (24)$$

$$l = \sum_{j=1}^n d_j, \quad (25)$$

где d_j – длина хорд, полученных разбиением периодической кривой; $x_i, x_{i-1}, y_i, y_{i-1}$ – координаты начала и конца каждой хорды периодической кривой; n – число хорд.

Приняв допустимую погрешность $\Delta_{hдон}$ обработки, равную допуску на ширину многопериодной дорожки из формулы (21), найдем число деталей, которые можно обработать с одной заточки фрезы:

$$n = \frac{\Delta_{hдон} + \Delta_T + \Delta_{p.б.}}{\Delta_u}. \quad (26)$$

На точность обработки профиля многопериодной дорожки также влияют элементарные погрешности, возникающие при контурной обработке на станках с ЧПУ. Суммарную погрешность, учитывающую погрешности станков с ЧПУ, можно найти по формуле, используя методику [2]:

$$\delta_{\Sigma} = \frac{1}{K} \sqrt{(K_1 \delta_{np})^2 + (K_2 \delta_{noz})^2 + (K_3 \delta_{ym})^2 + (K_4 \delta_{po})^2 + (K_5 \delta_T)^2}, \quad (27)$$

где δ_{np} – погрешность программирования; δ_{noz} – погрешность позиционирования; δ_{ym} – погрешность от упругих деформаций технологической системы; δ_{po} – радиальное и осевое биения инструмента, установленного в шпинделе станка; δ_T – погрешность от температурных деформаций технологической системы; K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 – коэффициенты относительного рассеяния, характеризующие отношение поля рассеяния погрешности при нормальном законе распределения к действительному полю рассеяния; $1/K$ – коэффициент, корректирующий суммарную погрешность для заданной гарантированной надежности.

При экспериментальной оценке точности изготовления дорожки применялись косвенные методы измерений, так как профиль дорожки имеет сложную геометрическую форму и в настоящее время не разработаны средства контроля ее профиля. Поэтому отклонение дейст-

вительного профиля от номинального оценивали измерением накопленного шага на специальной установке.

На рис. 3 представлен график накопленной погрешности углового шага F_p , измеренного по пяти окружностям внешней поверхности дорожки диска с $z_2 = 13$ и рассчитанного по формуле

$$F_p = \varphi_0 - \varphi_n, \quad (28)$$

где φ_0 – действительный накопленный угловой шаг; φ_n – номинальный накопленный угловой шаг.

Значения накопленной погрешности шага составили 20...25 угловых минут или 0,21...0,26 мм в линейных величинах, если средний радиус дорожки $R = 60$ мм. Эти значения характеризуют погрешности профиля дорожки после обработки.

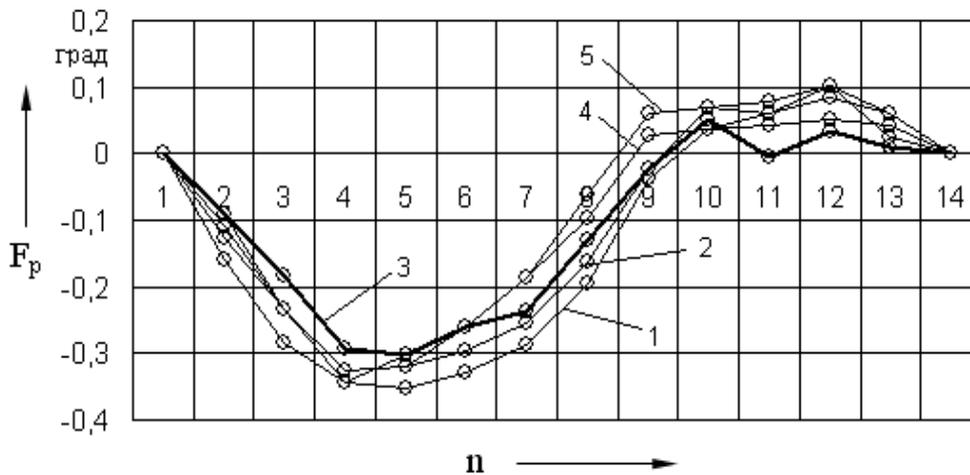


Рис. 3. Графики накопленной погрешности шага многопериодной дорожки

При гармоническом анализе функцию накопленной погрешности шага можно представить в виде ряда Фурье

$$F(\varphi) = a_0/2 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos k\varphi + b_k \sin k\varphi, \quad (29)$$

где $a_0/2$ – нулевой член разложения; a_k, b_k – коэффициенты ряда Фурье; k – порядковый номер гармонической составляющей.

Ряд (17) можно представить также в виде

$$F(\varphi) = c_0/2 + \sum_{k=1}^n c_k \sin(k\varphi + \varphi_k), \quad (30)$$

где c_k – амплитуда k -й гармоники; φ_k – начальная фаза; n – принятое число членов разложения функции $F(\varphi)$.

В результате гармонического анализа получены спектры амплитуд гар-

монических составляющих накопленной погрешности шага, по которым можно определить элементарные погрешности. Так, первая гармоника спектра имеет наибольшую амплитуду, на графиках выделяется однопериодная синусоида, что характеризует погрешность, вызванную смещением оси диска при его базировании относительно оси приспособления. В спектре амплитуд вторая, третья и последующие гармоники характеризуют отклонение формы обработанного профиля. При этом появляется овальность и огранка в поперечном сечении многопериодной дорожки.

Выводы

Разработанная методика расчета точности обработки многопериодных дорожек позволяет рассчитать наиболее значимые погрешности, возникающие

при изготовлении дорожек, определить суммарную погрешность обработки дорожки и провести гармонический ана-

лиз функции накопленной погрешности шага, чтобы оценить погрешность формы ее профиля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пашкевич, М. Ф.** Планетарные шариковые и роликовые редукторы и их испытания / М. Ф. Пашкевич, В. В. Герашенко – Минск : БелНИИТИ, 1992. – 248 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / Под ред. А. М. Дальского [и др.]. – М. : Машиностроение-1, 2001. – Т. 1. – 912 с.
3. Технологическая оснастка: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / М. Ф. Пашкевич [и др.]. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2002. – 320 с.
4. Технология машиностроения : учеб. пособие / М. Ф. Пашкевич [и др.] ; под ред. М. Ф. Пашкевича. – Минск : Новое Знание, 2008. – 478 с.
5. **Капитонов, А. В.** Влияние погрешностей деталей зацепления на кинематическую точность и плавность работы планетарных роликовых редукторов / А. В. Капитонов // Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Калининград, 17–19 окт. 2000 г. – Калининград : Калининград. гос. техн. ун-т, 2000. – Ч. 2. – С. 8.
6. Новые методы и средства измерения кинематических погрешностей передач в сборе / М. Ф. Пашкевич [и др.] ; Могилев. гос. техн. ун-т. – Могилев, 1999. – 17 с. – Деп. в БелИСА 22.11.1999. – № 1999111 // Реф. сб. неопубликуемых работ. – 2000. – Вып. 4 (15). – С.100.
7. **Пашкевич, М. Ф.** Кинематическая точность планетарных роликовых передач / М. Ф. Пашкевич, А. В. Капитонов ; Могилев. гос. техн. ун-т. – Могилев, 1999. – 11 с. – Деп. в ВИНТИ 23.09.1999. – № 2905-B99 // Журн. Изв. НАН Беларуси. – 2000. – № 1. – С.152.
8. **Пашкевич, М. Ф.** Погрешности планетарных роликовых передач с симметрично нагруженными роликами / М. Ф. Пашкевич, А. В. Капитонов ; Могилев. гос. техн. ун-т. – Могилев, 1999. – 18 с. – Деп. в БелИСА 22.11.1999. – № 1999118 // Реф. сб. неопубликуемых работ. – 2000. – Вып. 4. – С. 100.

LIST OF LITERATURE

1. **Pashkevich, M. F.** Planetary ball and roller reduction gears and their testing / M. F. Pashkevich, V. V. Gerashchenko. – Minsk : BelNIINTI, 1992. – 248 p.
2. Mechanical engineer reference book : in 2 volumes / Edited by A. M. Dalsky [et al.]. – M. : Mashinostroenie-1, 2001. – Vol. 1. – 912 p.
3. Production tooling: textbook for mechanical engineering students of HEI / M. F. Pashkevich [et al.]. – Minsk : Adukatsiya i vykhavanne, 2002. – 320 p.
4. Technology of machine-building: tutorial / M. F. Pashkevich [et al.] ; edited by M. F. Pashkevich. – Minsk : Novoe Znanie, 2008. – 478 p.
5. **Kapitonov, A. V.** Influence of engagement parts defects upon kinematic accuracy and smoothness of the operation of planetary roller reduction units / A. V. Kapitonov // Advanced technologies, machines and mechanisms in machine-building : thesis of reports of international scien.-tech. conf., Kaliningrad, 17–19 Oct. 2000. – Kaliningrad : Kaliningrad State Techn. Un-ty, 2000. – P. 2. – P. 8.
6. New methods and measurement devices for kinematic inaccuracies of transmissions ready-assembled / M. F. Pashkevich [et al.] ; Mogilev State Techn. Un-ty. – Mogilev, 1999. – 17 p. – Deposited in BelISA 22.11.1999. – № 1999111 // Journal of unpublished abstracts. – 2000. – Issue 4 (15). – P. 100.
7. **Pashkevich, M. F.** Kinematic accuracy of planetary roller gearings / M. F. Pashkevich, A. V. Kapitonov ; Mogilev State Techn. Un-ty. – Mogilev, 1999. – 11 p. – Deposited in VINITI 23.09.1999. – № 2905-V99 // Proceedings of NAN of Belarus. – 2000. – № 1. – P. 152.
8. **Pashkevich, M. F.** Errors of planetary roller gearings with symmetrically loaded rollers / M. F. Pashkevich, A. V. Kapitonov ; Mogilev State Techn. Un-ty. – Mogilev, 1999. – 18 p. – Deposited in BelISA 22.11.1999. – № 1999118 // Journal of unpublished abstracts. – 2000. – Issue 4. – P. 100.

LIST OF LITERATURE (TRANSLITERATION)

1. **Pashkevich, M. F.** Planetarnye sharikovye i rolikovye reduktory i ikh ispytaniya / M. F. Pashkevich, V. V. Gerashchenko – Minsk : BelNIINTI, 1992. – 248 s.
2. Spravochnik tekhnologa-mashinostroytelya : v 2 tomakh / Pod red. A. M. Dalskogo, A. G. Kosilova, R. K. Meshcheryakova, A. G. Suslova. – M. : Mashinostroenie-1, 2001. – T. 1. – 912 s.
3. Tekhnologicheskaya osnastka : uchebnik dlya studentov mashinostr. spets. vuzov / M. F. Pashkevich [i dr.]. – Minsk : Adukatsiya i vykhavanne, 2002. – 320 s.
4. Tekhnologiya mashinostroeniya: uchebnoe posobie / M. F. Pashkevich [i dr.] ; pod red. M. F. Pashkevicha. – Minsk : Novoe Znanie, 2008. – 478 s.
5. **Kapitonov, A. V.** Vliyaniye pogreshnostej detalej zatsepleniya na kinematicheskuyu tochnost' i plavnost' raboty planetarnykh rolikovykh reduktorov / A. V. Kapitonov // Progressivnye tekhnologii, mashiny i mekhanizmy v mashinostroenii : tez. dokl. mezhd. nauch.-tekhn. konf., Kaliningrad, 17–19 okt. 2000. – Kaliningrad : Kaliningrad gos. tekhn. un-t, 2000. – Ch. 2. – S. 8.
6. Novye metody i sredstva izmereniya kinematicheskikh pogreshnostej peredach v sbore / M. F. Pashkevich [i dr.] ; Mogilev gos. tekhn. un-t. – Mogilev, 1999. – 17 p. – Dep. v BelISA 22.11.1999. – № 1999111 // Ref. sb. nepublikuemykh работ. – 2000. – Vypusk 4 (15). – S. 100.
7. **Pashkevich, M. F.** Kinematicheskaya tochnost' planetarnykh rolikovykh peredach / M. F. Pashkevich, A. V. Kapitonov ; Mogilev gos. tekhn. un-t. – Mogilev, 1999. – 11s. – Dep. v VINITI 23.09.1999. – № 2905-V99 // Zhurn. Izv. NAN Belarusi. – 2000. – №1. – S.152.
8. **Pashkevich, M. F.** Pogreshnosti planetarnykh rolikovykh peredach s simmetrichno nagruzhennymi rolikami / M. F. Pashkevich, A. V. Kapitonov ; Mogilev gos. tekhn. un-t. – Mogilev, 1999. – 18 s. – Dep. v BelISA 22.11.1999. – № 1999118 // Ref. sb. nepublikuemykh работ. – 2000. – Vyp. 4. – S. 100.

Статья сдана в редакцию 13 сентября 2011 года

Александр Валентинович Капитонов, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: kapitonov63@tut.by.

Alexander Valentinovich Kapitonov, PhD, Associate Professor, Belarusian-Russian University. E-mail: kapitonov63@tut.by.