
УДК 621.83.06

А. В. Капитонов, С. Г. Черняков

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ПЛАНЕТАРНЫХ РОЛИКОВЫХ ПЕРЕДАЧ МЕТОДАМИ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И КОНТРОЛЯ В СБОРЕ

UDC 621.83.06

A. V. Kapitonov, S. G. Chernyakov

RESEARCH INTO THE KINEMATIC ACCURACY OF PLANETARY ROLLER GEARINGS BY USING THE METHODS OF HARMONIC ANALYSIS AND READY-ASSEMBLED GEARING MONITORING

Аннотация

В статье приведены исследования кинематической точности планетарных роликовых передач и проведен анализ погрешностей изготовления их основных деталей, входящих в зацепление. На основе экспериментальных исследований кинематической точности планетарных роликовых передач в сборе получен широкий спектр гармонических составляющих кинематической погрешности, позволивший установить ее технологические источники и характер влияния элементарных погрешностей деталей передачи на гармонические составляющие с наибольшими амплитудами. При проведении исследований использовались методы гармонического анализа экспериментальных данных на основе разложения функции кинематической погрешности в ряд Фурье и автоматического контроля передач в сборе.

Ключевые слова:

кинематическая точность, погрешности изготовления, гармонический анализ, планетарная роликовая передача.

Abstract

The paper deals with the research into the kinematic accuracy of planetary roller gearings and performs the analysis of manufacturing errors of their main intermeshed components. As a result of the experimental research into the kinematic accuracy of planetary roller ready-assembled gearings, a wide spectrum of harmonic constituents of the kinematic error was obtained, which allowed establishing its technological sources and the nature of influence of elementary errors of gearing components on harmonic constituents with the highest amplitudes. In the research, methods of harmonic analysis of experimental data based on the decomposition of kinematic error function into the Fourier series and of automatic monitoring of ready-assembled gearings were used.

Key words:

kinematic accuracy, manufacturing errors, harmonic analysis, planetary roller transmission.

Введение

Точность машин и механизмов является основной характеристикой их качества. Традиционные механические передачи (зубчатые, червячные, реечные и др.) имеют широкое применение во всех отраслях машиностроения, их точность хорошо изучена, они непрерывно совершенствуются как в отноше-

нии технологии изготовления, так и повышения точности.

Нетрадиционные передачи, такие как планетарные роликовые, в отношении точности в настоящее время еще недостаточно исследованы, хотя современная промышленность все больше нуждается в малогабаритных механических передачах. Достоинствами этих передач являются компактность, удоб-

ная компоновка, обусловленная соосностью валов, простота конструкции, низкая трудоемкость изготовления, возможность обеспечения больших передаточных отношений в одной ступени и ряд других.

К настоящему времени еще мало исследований в отношении кинематической точности этих передач и точности изготовления их деталей. Также неизвестно, в каком соотношении по кинематической точности и плавности работы находятся планетарные роликовые передачи по сравнению с зубчатыми.

Одним из существенных вопросов при решении задач исследования точности этих передач является вопрос о средствах измерения их кинематических погрешностей. Учитывая специфику планетарных роликовых передач, по-видимому, наиболее эффективными для них окажутся методы, которые позволяют измерять кинематические погрешности передач в сборе и производить последующее разложение полученной функции кинематической погрешности на гармонические составляющие с целью установления их связи с погрешностями деталей передачи.

Геометрические параметры планетарной роликовой передачи

Рассмотрим планетарную роликовую передачу, построенную на основе шестой кинематической схемы и относящуюся к передачам первого класса в классификации, представленной в [1, 2].

Эти передачи позволяют получить больший диапазон передаточных отношений, проще в изготовлении и сборке и менее металлоемки, чем передачи, построенные на основе других кинематических схем. В планетарной роликовой передаче ролики могут быть нагружены консольно и симметрично. При симметричном нагружении роликов неподвижным звеном передачи являются симметрично расположенные детали с многопериодными дорожками, которые могут иметь форму дисков. Такое нагружение является предпочтительным, т. к. при этом уменьшаются перекос роликов и их заклинивание, нагрузки на каждый диск и износ дисков-сепараторов и дисков с многопериодными дорожками.

На рис. 1 представлена конструктивная схема планетарной роликовой передачи, а на рис. 2 – схема ее зацепления.

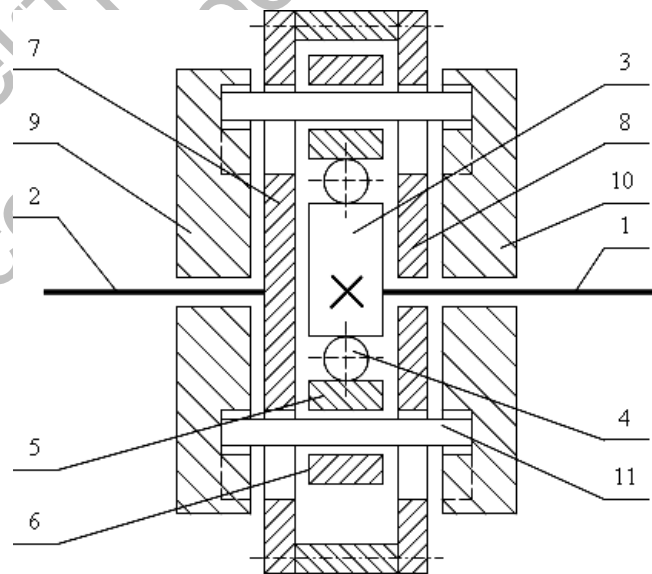


Рис. 1. Схема планетарной роликовой передачи с симметрично нагруженными роликами

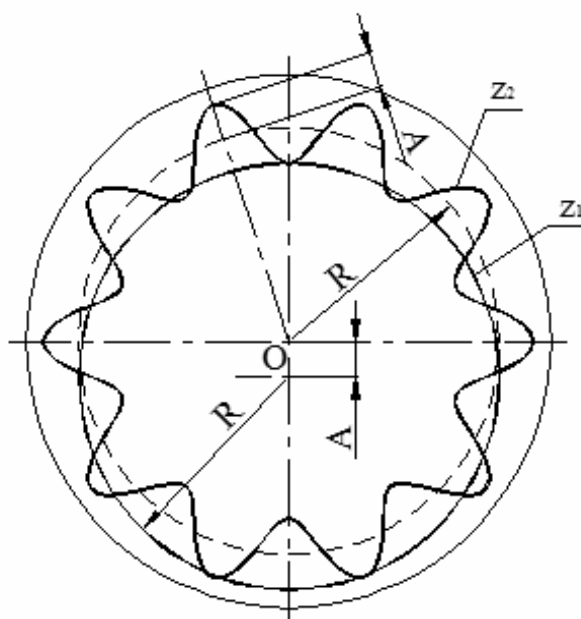


Рис. 2. Схема зацепления планетарной роликовой передачи

Передача (см. рис. 1 и 2) состоит из ведущего звена, содержащего ведущий вал 1 и жестко связанный с ним эксцентрик 3, подшипник 4 и кольца 5 и 6, ведомого звена, содержащего ведомый вал 2, водило, состоящее из двух, соединенных между собой дисков-сепараторов 7 и 8, каждый из которых имеет прорезы, взаимодействующие с роликами, и неподвижного звена, состоящего из двух симметрично расположенных дисков 9 и 10 с многопериодными дорожками. Диск-сепаратор 7 жестко соединен с выходным валом 2. Вращение от ведущего вала на водило передается за счет движения роликов 11 вокруг оси редуктора, при котором ролики увлекают за собой водило.

В передаче многопериодная дорожка для роликов образована фрезой, перемещающейся по периодической кривой, описываемой уравнением [1, 2]

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

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

Однопериодная дорожка представляет собой кольцевую щель для роликов, образованную кольцами 5 и 6. Ось этой дорожки описывается уравнением смещенной окружности при $z_2 = 1$:

$$\rho_1 = \sqrt{R^2 - A^2 \sin^2 \varphi} + A \cos \varphi. \quad (2)$$

Передаточное отношение рассматриваемой роликовой передачи определяется по формуле [1, 2]

$$u = \frac{z_1 + z_2}{z_1}. \quad (3)$$

При $z_1 = 1$ передаточное отношение равно числу роликов-сателлитов или числу прорезей (пазов) диска-сепаратора.

Выбор методов исследования кинематической точности планетарных роликовых передач

При исследовании погрешностей зубчатых колес, как известно, использовались два основных метода [3, 4]: приведение всех погрешностей изделия к единой системе отсчета и рассмотрение функцио-

нального характера ошибок колеса.

Система отсчета связана с наложенным на колесо воображаемого контура точной рейки и возникающими при этом двумя потенциальными линиями зацепления. Погрешности, изменяющиеся в функции угла поворота колеса, рассматриваются как избыточные приращения отрезков каждой линии зацепления, по которой происходит передача движения от реального колеса к профилю рейки.

Для планетарных роликовых передач в качестве геометрического параметра, с которым можно связать образование погрешностей, удобно принять полярные координаты однопериодной и многопериодной кривых – радиус-вектор ρ и угол φ , определяющий положение радиус-вектора. Значение ρ находится по формулам (1) и (2). Пересечение этих кривых определяет положение центра ролика. При этом радиус-векторы ρ для обеих кривых равны.

При наличии погрешностей точка пересечения кривых перемещается относительно ее номинального положения на некоторый угол $\Delta\varphi$. При этом ее новому положению соответствует радиус-вектор ρ_1 . Геометрическая разность длин радиус-векторов ρ и ρ_1 дает приращение $\Delta\rho$ радиус-вектора ρ , которое характеризует погрешности передачи.

Рассмотрение функционального характера ошибок зубчатого колеса заключается в том, что погрешности, возникающие при его изготовлении, рассматриваются как функции угла поворота этого колеса при его работе и при контроле. Таким образом, кинематическая погрешность колеса за его полный оборот представляет собой функцию погрешности угла поворота этого колеса, учитывающую его неточности изготовления. Разложив эту функцию на гармонические составляющие с помощью рядов Фурье, по периоду гармоник и величинам амплитуд можно определить наиболее значимые гармоники и связанные с ними погрешности изго-

товления зубчатых колес. Именно гармонический анализ дает полное представление о технологических погрешностях, которые проявляются в работе передачи.

Таким образом, функциональный метод исследования ошибок зубчатых колес позволяет через измерение кинематической погрешности с использованием гармонического анализа связать в единую систему технологические, метрологические и эксплуатационные причины возникновения погрешностей.

Изложенный метод представляется наиболее подходящим для исследования точности не только зубчатых, но и планетарных роликовых передач. Исследуемые передачи содержат в зацеплении детали различной геометрии и сложности, в зацеплении одновременно находится 5 деталей разной конструкции, поэтому для этих передач наиболее приемлемым методом является измерение общей ошибки передачи в сборе – ее кинематической погрешности и разложение этой погрешности на гармонические составляющие с последующим анализом этих гармоник. Так как деталей в зацеплении планетарных роликовых передач всегда больше, чем в зубчатом, то и значимых гармоник, характеризующих погрешности деталей зацепления, также должно быть больше, а зависимости между погрешностями, по видимому, будут более сложными, чем в зубчатых передачах.

Экспериментальная оценка кинематической точности планетарных роликовых редукторов

Для оценки кинематических погрешностей планетарных роликовых передач на кафедре «Технология машиностроения» Белорусско-Российского университета разработан стенд (рис. 3).

На общем основании 1 (см. рис. 3) установлен приводной двигатель 2, электромагнитный тормоз 3 с обмоткой управления 4. Испытуемая передача 5 соединена муфтами 6, 7 с двигателем и

тормозом, а пружинной муфтой 8 – со стандартным преобразователем угловых перемещений 9 типа ВЕ 178А, снабженным оптическим формирователем импульсов с числом отсчетов за оборот $N = 2500$. Информация от преобразователя обрабатывается информационно-измерительной системой 11, выполненной в виде платы расширения ПЭВМ 10.

Питание преобразователя и тормоза осуществляется источниками 13 и 12. Наличие электромагнитного тормоза дает возможность исследовать изменение кинематической погрешности передачи при различных нагрузках (постоянных, гармонических и случайных), моделирующих эксплуатационные условия.

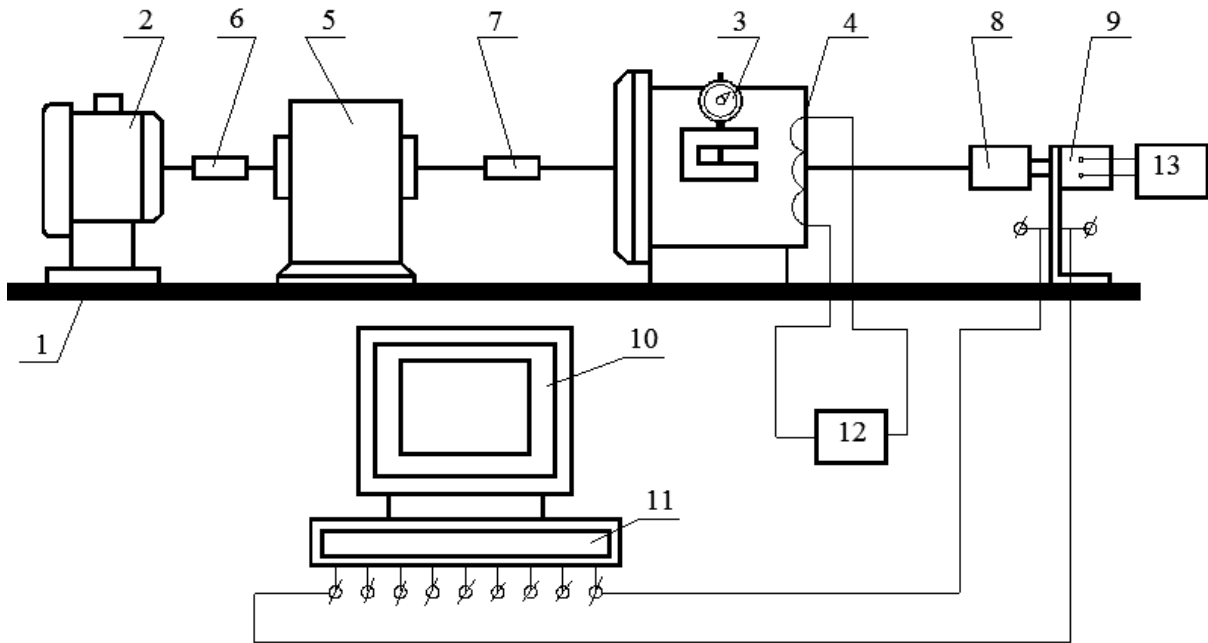


Рис. 3. Схема стана для автоматизированного контроля кинематических погрешностей передач в сборе

Преобразователем при вращении ведомого вала формируется последовательность прямоугольных импульсов равной амплитуды, но различной скважности, связанной с наличием кинематических погрешностей и неравномерности частоты вращения вала [5, 6]. В силу того, что кинематические погрешности передачи интегрируются за каждый оборот ведомого вала, мерой неравномерности вращения вала является отклонение частоты следования импульсов от ее среднего значения.

Таким образом, кинематическая погрешность передачи может быть оценена по формуле

$$F = \left(t_k - \frac{2\pi}{N\omega} k \right) \cdot \omega r, \quad (4)$$

где t_k – время, соответствующее началу фронта k -го импульса; ω – угловая частота вращения выходного вала; N – число отсчетов кинематической погрешности за оборот входного вала.

Формула (4) с учетом средней длительности импульсов t_{cp} может быть приведена к более удобному для расчетов виду

$$F = (t_k - k t_{cp}) \cdot \omega r. \quad (5)$$

Данная формула позволяет оценить кинематическую погрешность пе-

редачи в том случае, если $\omega = \text{const}$. Поэтому на ведущем валу передачи (на валу приводного электродвигателя) полезно установить инерционную массу, обеспечивающую строгую равномерность вращения ведущего вала исследуемой передачи. Однако, как правило, ротор приводного двигателя обладает достаточной для выполнения данного условия инерционностью и чаще всего в дополнительной инерционной массе нет необходимости.

Последовательность импульсов, формируемая преобразователем угловых перемещений, вводится в информационно-измерительную систему. При этом информация с преобразователя фиксируется в ASCII-файле в виде таблицы «Напряжение–время». Учитывая тот факт, что напряжение от преобразователя в большей или меньшей степени искажено шумами, специальной программой производится дискретное преобразование длительностей импульсов по принципу аналого-цифрового преобразования относительно среднего уровня. Затем автоматически рассчитывается кинематическая погрешность передачи по формуле (5).

При гармоническом анализе функцию кинематической погрешности передачи можно представить в виде ряда Фурье [7, 8]:

$$F(\varphi) = a_0 / 2 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos k\varphi + b_k \sin k\varphi, \quad (6)$$

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

Ряд (6) можно представить также в виде

$$F(\varphi) = c_0 / 2 + \sum_{k=1}^n c_k \sin(k\varphi + \varphi_k), \quad (7)$$

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

На рис. 4 представлен график кинематических погрешностей планетарного роликowego редуктора с передаточным отношением $u = 14$ без нагрузки на выходном валу.

На рис. 5 представлен спектр амплитуд кинематической погрешности этого же редуктора для 400 гармоник. Как видно из этих графиков, просматривается три участка скопления гармоник с наибольшими значениями амплитуд. Это гармоники 1...3, характеризующие погрешности ведомого и неподвижного звена; гармоники 13...15, характеризующие погрешности ведущего звена; и высокочастотные гармоники 168...196, характеризующие частоту смены роликов в зацеплении.

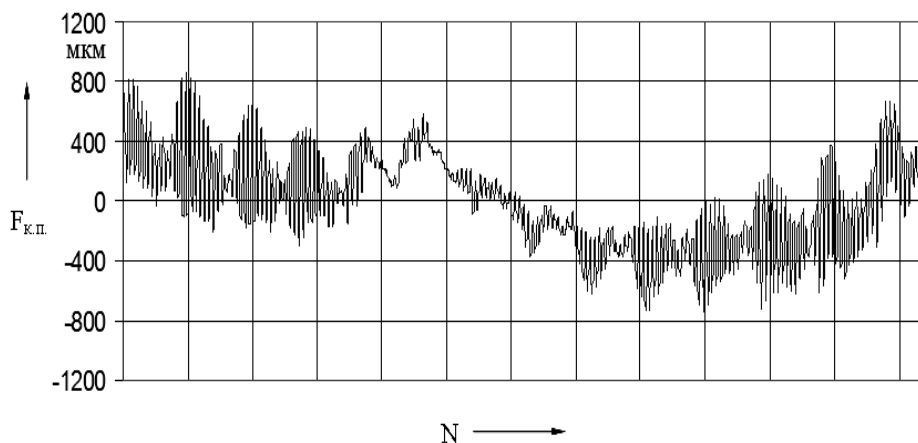


Рис. 4. График кинематической погрешности экспериментального роликowego редуктора с $u = 14$

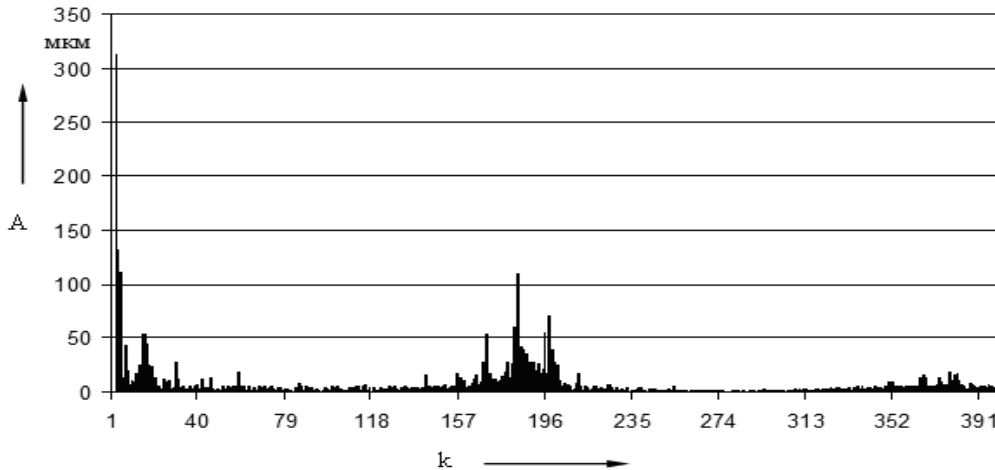


Рис. 5. Спектр амплитуд кинематической погрешности планетарного роликового редуктора с 1 по 400 гармонику

Также проводились измерения кинематических погрешностей редукторов с разными передаточными отношениями под нагрузкой.

На графиках по оси ординат отложены значения кинематической погрешности $F_{к.п.}$ и значения амплитуд гармоник A в линейных величинах, приведенных к радиусу 100 мм. По оси абсцисс откладываются для кинематической погрешности – номера измерений, для спектров – номера гармоник.

На графике кинематической погрешности четко просматривается однопериодная синусоида, выраженная в спектре амплитуд значением первой гармоники, значительно превышающей значения амплитуд остальных гармоник. Также на графике видно проявление высокочастотных погрешностей, которые накладываются на однопериодную синусоиду и дают значительную величину местных погрешностей.

На некоторых участках кривой высокочастотные колебания незначительны, и график кинематической погрешности на этих участках представляет собой вытянутую сглаженную линию, что связано с разными величинами неточностей деталей зацепления за период вращения.

Оценить элементарные состав-

ляющие кинематической погрешности планетарного роликового редуктора с $u = 14$ позволяет спектр амплитуд. На спектрах, при различных нагрузках на ведомом валу, так же как и без нагрузки, выделяется три участка гармоник с наибольшими значениями амплитуд. Это низкочастотный участок (гармоники 1...3), среднечастотный (гармоники 13 и 14) и высокочастотный (гармоники с наибольшими амплитудами 182 и 196). При этом значения амплитуд среднечастотных и высокочастотных гармоник с увеличением нагрузки уменьшаются. Наиболее выражены гармоники с номерами 1, 2, 3, 12, 13, 14, 15, 26, 28, 182, 196. Гармоники 182 и 196 характеризуют процесс периодического контакта роликов с многопериодной дорожкой и с сепаратором.

Анализ кинематических погрешностей передачи и их технологических источников

Проанализируем элементарные погрешности планетарного роликового редуктора с передаточным отношением $u = 14$, полученные экспериментально. Как показывают исследования, наибольшую амплитуду имеют гармоники, связанные с вращением ведомого и ве-

душего звеньев. Это первая гармоника и гармоника, номер которой равен передаточному отношению редуктора. Амплитуда первой гармоники характеризует величину радиальных и тангенциальных погрешностей передачи, имеющих период 2π (полный оборот выходного вала). Радиальные погрешности ведомого звена возникают из-за несовпадения оси средней окружности многопериодной дорожки диска с осью вращения выходного вала, жестко связанного с сепаратором. При этом возникает погрешность угла поворота ведомого вала передачи. Несовпадение осей средней окружности многопериодной дорожки и выходного вала приводит к появлению погрешности эксцентриситета e_p , которая предопределяет величину кинематической погрешности

$$\Delta F_p = \frac{e_p}{2} \sin(\varphi + \varphi_p), \quad (8)$$

где $e_p/2$ – составляющая амплитуды первой гармоники кинематической погрешности передачи, характеризующая радиальные погрешности ведомого звена; φ_p – фазовый угол; φ – текущий угол поворота выходного вала.

Погрешность эксцентриситета e_p является следствием ряда технологических погрешностей. К ним относятся погрешности базирования деталей с многопериодными дорожками на станке e_δ , погрешности относительного расположения деталей выходного звена при сборке $e_{c\delta 1}$ и радиальное биение подшипников, на которые установлен выходной вал редуктора e_{n1} . Так как направление этих погрешностей неизвестно, то их суммирование производим геометрически. Следовательно,

$$e_p = \sqrt{e_\delta^2 + e_{c\delta 1}^2 + e_{n1}^2}. \quad (9)$$

Тангенциальные погрешности ведомого звена образуются из-за неточностей станка, которые переносятся на де-

таль при фрезеровании дорожки, погрешностей профилей рабочих поверхностей периодической канавки из-за неточностей программирования на станке с ЧПУ, колебаний диаметров роликов, зазоров в передаче. Эти погрешности проявляются в виде накопленной погрешности с периодом, равным 2π (обороту выходного вала).

Таким образом, если амплитуда радиальных погрешностей – эксцентриситет e_p , а амплитуда тангенциальных погрешностей – некоторая величина e_m , то при работе передачи эти амплитуды складываются и дают суммарную погрешность, которую характеризует амплитуда первой гармоники. Согласно [3, 4], её параметры можно представить соотношениями:

$$\Delta F_\Sigma = \frac{c}{2} \sin(\varphi + \psi); \quad (10)$$

$$c = \sqrt{e_p^2 + e_m^2 + 2e_p e_m \cos(\varphi_p + \varphi_m)}; \quad (11)$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{e_p \sin \varphi_p + e_m \sin \varphi_m}{e_p \cos \varphi_p + e_m \cos \varphi_m}, \quad (12)$$

где φ_p и φ_m – фазовые углы соответственно радиальной и тангенциальной погрешностей ведомого звена.

Рассмотрим погрешности ведущего звена редуктора. Радиальные погрешности этого звена возникают из-за смещения оси ведущего вала относительно средней окружности многопериодной дорожки, в результате чего появляется эксцентриситет e_{p1} , который включает ряд погрешностей. К этим погрешностям относятся: радиальные погрешности ведомого звена – погрешности базирования деталей с многопериодными дорожками на станке δ_δ ; погрешности относительного расположения деталей ведущего звена при сборке $\delta_{c\delta 2}$; радиальное биение подшипников, на которые установлен ведущий вал и ведущее кольцо δ_{n2} ; отклонение от соосности ведущего и ведомого валов δ_δ .

Тогда

$$e_{p1} = \sqrt{e_{\delta}^2 + e_{c\delta 2}^2 + e_{n2}^2 + e_{\delta}^2}. \quad (13)$$

Кинематическая погрешность, учитывающая только эксцентриситет e_{p1} , будет иметь вид:

$$\Delta F_{p1} = \frac{e_{p1}}{2} \sin(k\varphi + \varphi_{p1}), \quad (14)$$

где k – номер гармоники, $k = u$ (u – передаточное отношение редуктора); φ_{p1} – фазовый угол.

К радиальным погрешностям ведущего звена также относятся: погрешность эксцентриситета эксцентрика δ_3 и погрешность диаметра ведущего кольца δ_6 . Эти погрешности в спектре амплитуд кинематической погрешности имеют одинаковую частоту, равную $k = u - 1$.

Кроме погрешностей ведомого и ведущего звеньев, на кинематическую погрешность планетарного роликового редуктора в наибольшей степени влияют высокочастотные погрешности с частотой повторения, во много раз превосходящей оборот ведущего звена. Эти погрешности были получены экспериментально. Номера гармоник с наибольшей амплитудой можно определить по формуле

$$k = u \cdot n, \quad (15)$$

где u – передаточное отношение редуктора; n – число смен рабочих роликов в зацеплении за оборот ведущего звена.

Во многих случаях число n приблизительно равно числу роликов в передаче или передаточному отношению редуктора. Как видно из спектра амплитуд кинематической погрешности редуктора (см. рис. 5), амплитуды высокочастотных гармоник представляют группу гармоник с близкими по значению величинами амплитуд. Погрешности, соответствующие этим гармоникам, связаны с неплавностью работы передачи, вызванной дисбалансом ведущего звена. При устранении дисбаланса эти высокочастотные погрешности значи-

тельно уменьшаются.

Из спектра амплитуд кинематической погрешности планетарного роликового редуктора видно, что наибольшие амплитуды (кроме амплитуд, рассмотренных выше) имеют гармоники 2...5, а также гармоники, кратные числу периодов дорожки диска и кратные передаточному отношению редуктора. Погрешности, которые соответствуют гармоникам 2...5, значительно меньше погрешностей, которые проявляются за полный оборот вращения ведомого вала. Наибольшие значения амплитуд из этих гармоник имеют 2 и 3, которые связаны с неточностью воспроизведения теоретической многопериодной дорожки при ее изготовлении. Эти гармоники проявляются при измерении накопленной погрешности шага дорожки.

Как показывают экспериментальные исследования, первая и близкие к ней гармоники более высокой частоты связаны между собой. Увеличение 1 гармоники приводит к увеличению 2, 3, а также в некоторых случаях 4 и 5 гармоник (в зависимости от передаточного отношения редуктора). В зависимости от соотношений начальных фаз 1, 2 и 3 гармоник увеличение 1-й гармоники может в большей или меньшей степени увеличивать 2 и 3 гармоники.

При изготовлении многопериодной дорожки зазоры в кинематических цепях фрезерных станков с ЧПУ приводят к появлению погрешностей в направлении перемещения суппортов вдоль осей OX и OY . Эти погрешности в наибольшей степени проявляются в четвертой гармонике спектра амплитуд кинематической погрешности.

Заключение

1. В результате экспериментальных исследований получен широкий спектр амплитуд гармонических составляющих кинематической погрешности планетарной роликовой передачи, позволивший установить частотные области гармонических составляющих с

наибольшими амплитудами, а также оценить уровень кинематической точности и плавности работы передачи.

2. Гармонический анализ кинематических погрешностей и их технологических источников передачи показал, что в спектре амплитуд можно выделить три основных диапазона частот: низкочастотный, обусловленный погрешностями деталей с многопериодными дорожками; среднечастотный, характеризующий погрешности деталей ведущего звена; и вы-

сокочастотный, связанный с дисбалансом ведущего звена.

3. Рекомендуется для повышения кинематической точности планетарных роликковых передач использовать отдельную обработку многопериодных дорожек, уменьшать зазоры и эксцентриситеты сопрягаемых деталей при сборке редуктора, проводить балансировку ведущего звена, что видно из полученных амплитудно-частотных спектров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пашкевич, М. Ф.** Планетарные шариковые и роликковые редукторы и их испытания / М. Ф. Пашкевич, В. В. Геращенко. – Минск : БелНИИТИ, 1992. – 248 с.
2. **Пашкевич, М. Ф.** Новые виды планетарных шариковых и роликковых редукторов / М. Ф. Пашкевич. – Минск : БелНИИТИ, 1990. – 47 с.
3. **Тайц, Б. А.** Точность и контроль зубчатых колес / Б. А. Тайц. – М. : Машиностроение, 1972. – 367 с.
4. **Тайц, Б. А.** Нормы точности и контроль зубчатых колес / Б. А. Тайц, Н. Н. Марков. – М. : Mashgiz, 1962. – 104 с.
5. **Ионак, В. Ф.** Приборы кинематического контроля / В. Ф. Ионак. – М. : Машиностроение, 1981. – 128 с.
6. **Чуев, Ю. В.** Прогнозирование количественных характеристик процессов / Ю. В. Чуев, Ю. В. Михайлов, В. И. Кузьмин. – М. : Сов. радио, 1975. – 400 с.
7. **Якушев, А. И.** Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения / А. И. Якушев. – М. : Машиностроение, 1979. – 352 с.
8. **Толстов, Г. П.** Ряды Фурье / Г. П. Толстов. – М. : Наука, 1980. – 384 с.

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. **Pashkevich, M. F.** New types of planetary ball and roller reduction gears / M. F. Pashkevich. – Minsk : BelNIINTI, 1990. – 47 p.
3. **Taits, B. A.** Accuracy and control of tooth gears / B. A. Taits. – M. : Mashinostroenie, 1972. – 367 p.
4. **Taits, B. A.** Standards of accuracy and control of tooth gears / B. A. Taits, N. N. Markov. – M. : Mashgiz, 1962. – 104 p.
5. **Ionak, V. F.** Kinematic control devices / V. F. Ionak. – M. : Mashinostroenie, 1981. – 128 p.
6. **Chuyev, Y. V.** Forecasting of quantitative characteristics of processes / Y. V. Chuyev, Y. V. Mikhailov, V. I. Kuzmin. – M. : Sov. radio, 1975. – 400 p.
7. **Yakushev, A. I.** Interchangeability, standardization and engineering measurements / A. I. Yakushev. – M. : Mashinostroenie, 1979. – 352 p.
8. **Tolstov, G. P.** Fourier series / G. P. Tolstov. – M. : Nauka, 1980. – 384 p.

LIST OF LITERATURE (TRANSLITERATION)

1. **Pashkevich, M. F.** Planetarnye sharikovyie i rolikovyie reduktory i ikh ispytaniya / M. F. Pashkevich, V. V. Gerashchenko – Minsk : BelNIINTI, 1992. – 248 s.
2. **Pashkevich, M. F.** Novye vidy planetarnykh sharikovykh i rolikovykh reduktorov / M. F. Pashkevich. – Minsk: BelNIINTI, 1990. – 47 s.
3. **Taits, B. A.** Tochnost' i kontrol' zubchatykh kolyos / B. A. Taits. – M. : Mashinostroenie, 1972. – 367 s.

4. **Taits, B. A.** Normy tochnosti i kontrol' zubchatykh kolyos / B. A. Taits, N. N. Markov. – M. : Mashgiz, 1962. – 104 s.
5. **Ionak, V. F.** Pribory kinematicheskogo kontrolya / V. F. Ionak. – M. : Mashinostroenie, 1981. – 128 s.
6. **Chuyev, Y. V.** Prognozirovaniye kolichestvennykh kharakteristik protsessov / Y. V. Chuyev, Y. B. Mikhailov, V. I. Kuzmin. – M. : Sov. radio, 1975. – 400 s.
7. **Yakushev, A. I.** Vzaimozamenaemost', standartizatsiya i tekhnicheskie izmereniya / A. I. Yakushev. – M. : Mashinostroenie, 1979. – 352 s.
8. **Tolstov, G. P.** Ryady Fur'e / G. P. Tolstov. – M. : Nauka, 1980. – 384 s.

Статья сдана в редакцию 7 октября 2011 года

Александр Валентинович Капитонов, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-029-240-34-89.
Сергей Геннадьевич Черняков, инженер-программист, Белорусско-Российский университет.

Alexander Valentinovich Kapitonov, PhD, Associate Professor, Belarusian-Russian University. E-mail : kapitonov63@tut.by.
Sergey Gennadyevich Chernyakov, programming engineer, Belarusian-Russian University.