

УДК 621.83.06

А. В. Капитонов, канд. техн. наук, доц.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ И АНАЛИЗ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПЛАНЕТАРНЫХ РОЛИКОВЫХ ПЕРЕДАЧ

В статье рассмотрена методика оценки кинематических погрешностей планетарных роликовых передач на базе экспериментальных исследований в статике и при работе передачи. Получены графики и спектры амплитуд кинематической погрешности передачи, проведен анализ гармонических составляющих спектра. Показано влияние балансировки редуктора на высокочастотные гармоники кинематической погрешности.

Методы и средства измерения кинематических погрешностей зубчатых колес позволяют определить погрешности лишь отдельных колес или двух колес в зацеплении без монтажа их с валами, подшипниками и корпусом. Они не подходят для контроля планетарных роликовых передач, т. к. для оценки их кинематической погрешности необходим контроль передачи в сборе.

С учетом сказанного, для экспери-

ментальных исследований роликовых передач в сборе разработаны устройства [1, 2], на которые получены патенты на изобретения. На базе этих устройств разработаны установки и методики оценки на этих установках кинематических погрешностей.

На рис. 1 представлена установка для измерения кинематической погрешности планетарного роликового редуктора в статике.

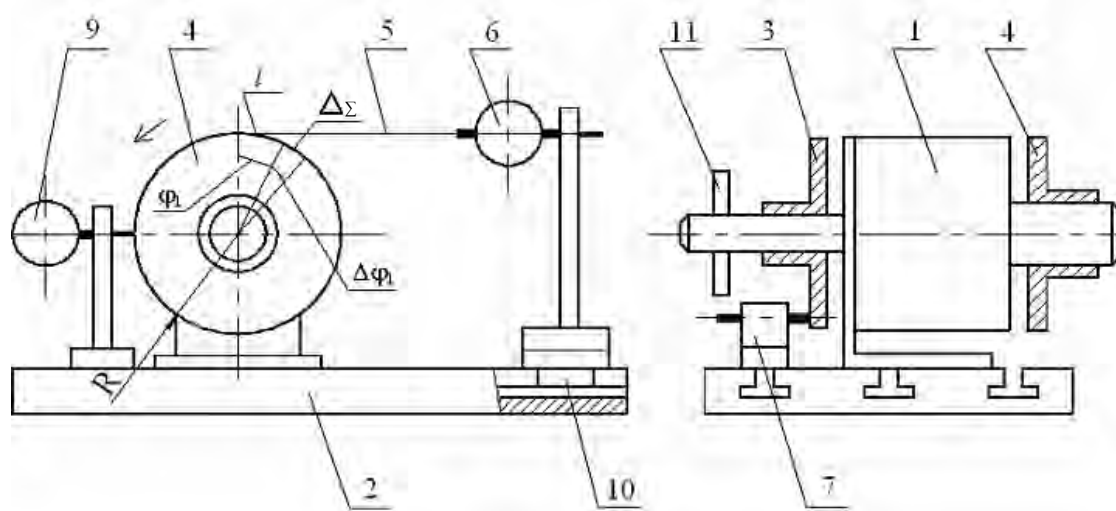


Рис. 1. Схема установки для измерения кинематических погрешностей механических передач в статике

На установке измеряется кинематическая погрешность при определенных углах поворотов ведущего и ведомого валов передачи. При этом не учитываются высо-

кочастотные погрешности передачи.

На ведущем валу исследуемой передачи 1 (см. рис. 1), установленной на основании 2, закреплен делительный диск

3, который имеет конические отверстия, расположенные на окружности с точностью межосевого расстояния $\Delta = 50$ мкм. На выходном (ведомом) валу редуктора закреплен измерительный диск 4, к цилиндрической поверхности которого прикреплена струна 5, связывающая этот диск с ножкой индикатора 6, закрепленного на штативе. Повороты ведущего вала передачи на равные углы осуществляются при помощи фиксатора 7 и рукоятки 11. Конический наконечник фиксатора под действием пружины последовательно входит в конические отверстия делительного диска 3, обеспечивая одинаковые углы поворота φ ведущего вала. Для измерения угла поворота ведомого вала используется индикатор 6, к ножке которого прикреплена струна.

При повороте ведущего вала на угол φ и, соответственно, ведомого вала на угол

$$\varphi_1 = \frac{\varphi}{u}, \quad (1)$$

где u – передаточное число передачи, струна, наматываясь на диск 4, перемещает ножку индикатора на величину, равную длине l дуги, соответствующей углу φ_1 , т. е.

$$l = \varphi_1 R, \quad (2)$$

где R – радиус измерительного диска 4, закрепленного на выходном валу редуктора.

Количество измерений за один полный оборот выходного вала составляет

$$n = \frac{2\pi}{\varphi_1} = \frac{2\pi u}{\varphi}. \quad (3)$$

Так как ход индикатора ограничен, то через определенное число поворотов ведущего вала штатив с индикатором необходимо передвигать в сторону перемещения струны и устанавливать индикатор на ноль. Прямолинейность перемещения штатива обеспечивается шпонкой 10, закрепленной в его основании и размещенной в Т-образном пазу основания 2.

Количество измерений за одно перемещение штатива составляет

$$n = \frac{a}{\varphi_1 R} = \frac{au}{\varphi R}, \quad (4)$$

где a – ход индикатора.

Кинематическую погрешность передачи $F_{к.п.}$ можно определить как разность между действительной l_d и номинальной l_n длинами дуг окружности измерительного диска радиуса R при его повороте на угол φ_1 , т. е.

$$F_{к.п.} = l_d - l_n. \quad (5)$$

Действительная длина дуги l_d определяется непосредственным измерением по показанию индикатора, а номинальная длина дуги определяется соотношением

$$l_n = \varphi_1 R, \quad (6)$$

где φ_1 – номинальный (расчетный) угол поворота выходного вала (в радианах), определяемый по соотношению (1).

На точность измерения влияет радиальное биение диска, установленного на выходном валу. Для оценки радиального биения диска 4 используется индикатор 9, показания которого Δ (см. рис. 1) учитываются при определении действительной длины дуги. С учетом показаний индикатора 9

$$F_{к.п.} = l_d - l_n \pm \Delta, \quad (7)$$

где верхний и нижний знаки принимаются в зависимости от направления радиального биения Δ .

Погрешность измерения на установке определим, учитывая случайные погрешности

$$\begin{aligned} \Delta_{\Sigma} &= k_1 \sqrt{\sum_{i=k}^n (\Delta_{м.р.}/u)^2 + \Delta_{р.с.}^2 + \Delta_{ин}^2 + \Delta_{ос}^2} = \\ &= 1,2 \sqrt{(50/14)^2 + 12^2 + 10^2 + 10^2} = \\ &= 22,6 \text{ мкм}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\Delta_{м.р.}$ – погрешность межосевого рас-

стояния отверстий делительного диска; $\Delta_{p.c.}$ – растяжение струны; $\Delta_{ин}$ – цена деления индикатора; $\Delta_{ов.}$ – погрешность формы цилиндрической поверхности измерительного диска; u – передаточное число роликовой передачи; k_1 – коэффициент относительного рассеивания, характеризующий степень отличия закона распределения от нормального рассматриваемого параметра.

Растяжение струны определим по формуле

$$\Delta_{p.c.} = \frac{F \cdot l}{E \cdot S}, \quad (9)$$

где F – усилие на ножке индикатора, $F = 0,5$ Н; E – модуль упругости, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; S – площадь поперечного сечения струны (диаметр струны $d = 0,2$ мм); l – длина струны, $l = 150$ мм.

При измерениях длина струны l будет изменяться, т. к. струна наматывается на измерительный диск, и растяжение струны будет непостоянным. В расчетах принята наибольшая длина струны.

Полученное значение $\Delta_{\Sigma} = 22,6$ мкм в угловых единицах, приведенное к радиусу $R = 100$ мм измерительного диска, составит 46,6 угл. с. При этом, чем больше будет радиус R , тем меньше будет погрешность измерения в угловых единицах. Так, если длина дуги (см. рис. 1), соответствующая значению Δ_{Σ} , равна $\Delta\varphi_1 R$, то

$$\Delta\varphi_1 = \frac{\Delta_{\Sigma} 180}{R\pi}. \quad (10)$$

Увеличив радиус измерительного диска, можно уменьшить суммарную погрешность измерения.

Для оценки кинематической погрешности приработанного и неприработанного роликового редуктора под нагрузкой были проведены измерения кинематических погрешностей при различных моментах на ведомом валу. При этом к ведомому валу редуктора присоединялся электромагнитный порошковый тормоз ПТБМ. Приработка редуктора выполнялась 20 ч. Кинематическая погрешность при измерениях выражена в линейных величинах и отнесена к окружности, соответствующей рабочему радиусу измерительного диска, который составляет 100 мм.

На рис. 2 и 3 представлены графики кинематических погрешностей приработанного редуктора без нагрузки и при нагружающем моменте на ведомом валу 20 Н·м.

На каждом рисунке построено 4 графика, полученных при измерениях 4 полных оборотов выходного вала. Видно, что графики не накладываются друг на друга, а имеют некоторое смещение по оси ординат. Это смещение связано с колебанием зазоров в передаче при дискретном измерении в статике.

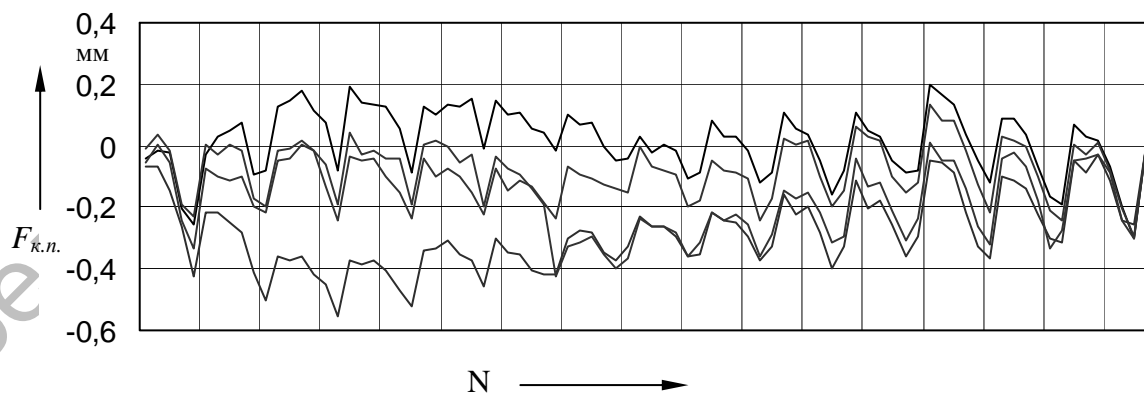


Рис. 2. Графики кинематической погрешности роликового редуктора после его приработки в течение 20 ч без нагрузки

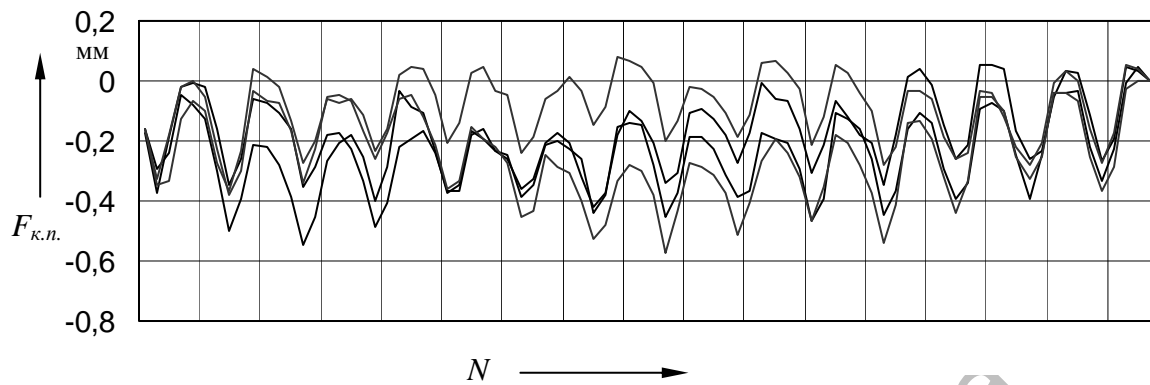


Рис. 3. Графики кинематической погрешности роликового редуктора после его приработки в течение 20 ч при нагрузке 20 Н·м

Так как измерение в статике происходит с остановками после каждого поворота ведущего вала, то ролики сначала входят в зацепление, а затем после поворота смещаются относительно фиксированного положения в пределах зазоров. Под нагрузкой, как видно из графиков (см. рис. 3), это смещение уменьшается. Таким образом, интервалы между верхними и нижними кривыми на рис. 2 и 3 характеризуют величины зазоров при каждом повороте ведомого вала.

На графиках также хорошо выделя-

ются 14 периодов за полный оборот выходного вала. Каждый из этих периодов соответствует полному обороту ведущего вала, т. к. передаточное число редуктора $u = 14$. Следовательно, каждый период кривой можно рассматривать как кинематическую погрешность ведущего вала редуктора.

На рис. 4 представлен спектр амплитуд кинематической погрешности планетарного роликового редуктора после его приработки в течение 20 ч без нагрузки.

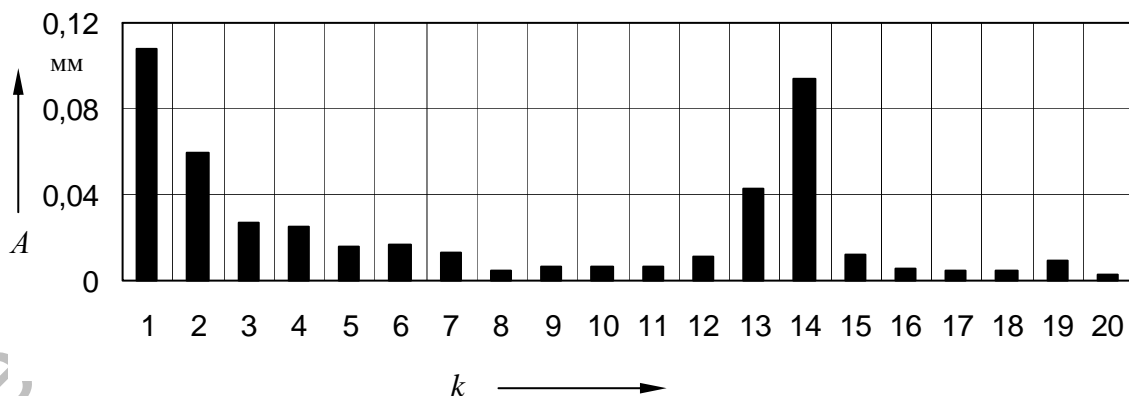


Рис. 4. Спектр амплитуд кинематической погрешности роликового редуктора после его приработки в течение 20 ч без нагрузки

Как видно из спектров, наибольшие амплитуды имеют 1 и 14 гармоники, характеризующие погрешности ведущего и ведомого звеньев редуктора. При измерениях в статике максимальная величина кинематической погрешности приработанного редуктора была в 1,2...1,4 раза меньше, чем неприработанного. В обоих случаях значение максимальной кинематической погрешности с увеличением нагрузки изменяется неоднозначно.

Результаты измерений кинематической погрешности в статике показали, что для планетарных роликовых редукторов с симметрично нагруженными роликами кинематическая погрешность составляет 18...30 угл. мин. При дискретном измерении кинематическая погрешность определялась по 84 точкам. Это не позволило выявить высокочастотные гармоники, которые были определены при работе передачи. К тому же в статике значение максимальной кинематической погрешности

за один оборот ведомого вала меньше действительного ее значения, т. к. здесь не проводится непрерывное измерение и не учитываются динамические свойства редуктора. Однако преимуществом при измерении в статике является отсутствие таких динамических явлений, как вибрации и шумы, которые накладываются на спектр кинематической погрешности и могут завышать ее значение. Кроме того, представленный метод не требует специальных дорогостоящих средств контроля и может эффективно применяться в условиях неспециализированного производства.

Для оценки кинематической погрешности опытных образцов планетарных роликовых передач при их работе был использован стенд, разработанный на кафедре «Технология машиностроения» на базе информационно-измерительной системы (рис. 5).

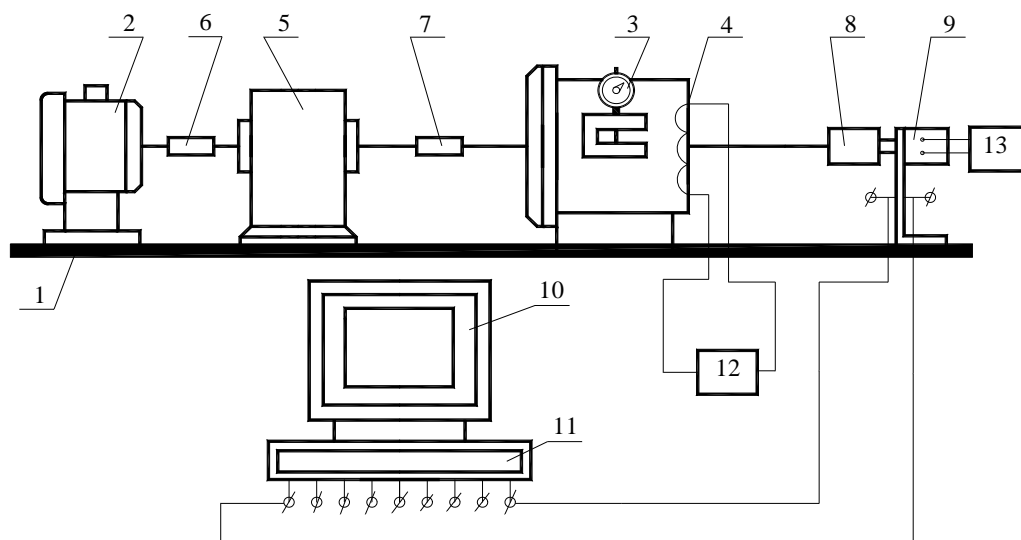


Рис. 5. Схема стенда для автоматизированного контроля кинематических погрешностей передач в сборе

На общем основании 1 (см. рис. 5) 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.

Преобразователем при вращении ведомого вала формируется последовательность прямоугольных импульсов равной амплитуды, но различной скважности, связанной с наличием кинематических погрешностей, и неравномерности частоты вращения вала. 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

$$F = \left(t_k - \frac{2\pi}{N \cdot \omega} \right) \cdot \omega \cdot r, \quad (11)$$

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

$$F = (t_k - k \cdot t_{cp}) \cdot \omega \cdot r. \quad (12)$$

Данная формула позволяет оценить кинематическую погрешность передачи 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 (12).

Погрешность измерительной системы определим по формуле

$$\Delta_{изм} = \frac{360^\circ}{n_{имп}}, \quad (13)$$

где $n_{имп}$ – число импульсов, формируемых преобразователем угловых перемещений за один оборот выходного вала, $n_{имп} = 32000$.

Погрешность измерительной системы составит $\Delta_{изм} = 40,5$ угл. с. Эта погрешность носит случайный характер.

На точность измерения также будут влиять систематические погрешности: эксцентриситеты от радиального биения валов электродвигателя и тормоза, эксцентриситеты от муфт 6, 7 и 8 (см. рис. 5). Эти погрешности составляют не более чем 2 угл. мин и проявляются в первой гармонике кинематической погрешности передачи. Отфильтровав амплитуду первой гармоники, можно исключить эти погрешности и не учитывать их при расчете погрешности измерения.

На рис. 6 представлен график кинематической погрешности планетарного роликового редуктора с передаточным числом $u = 14$. На рис. 7 представ-

лен спектр амплитуд кинематической погрешности этого же редуктора для 250 гармоник. Как видно из спектра амплитуд (см. рис. 7), просматривается три участка скопления гармоник с наибольшими значениями амплитуд: гармоники 1...3, ха-

рактеризующие погрешности ведомого звена; гармоники 13...15, характеризующие погрешности ведущего звена; высокочастотные гармоники 168...196, характеризующие смену роликов в зацеплении.

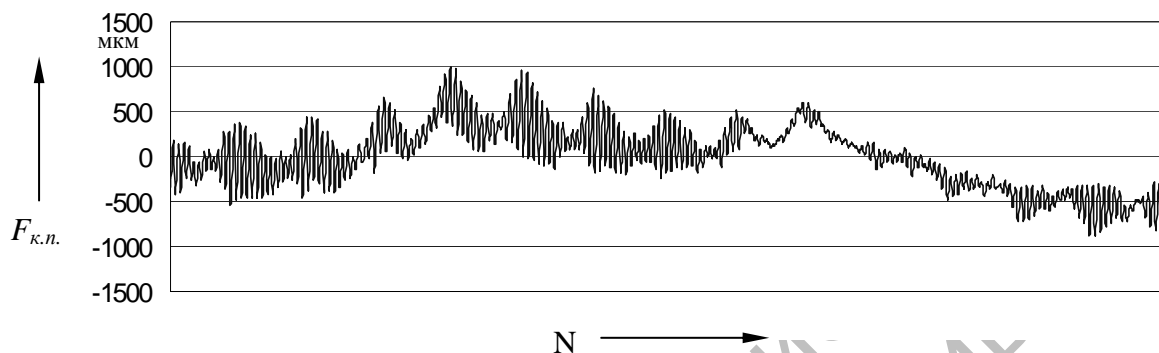


Рис. 6. Кинематическая погрешность редуктора под нагрузкой 10 Н·м

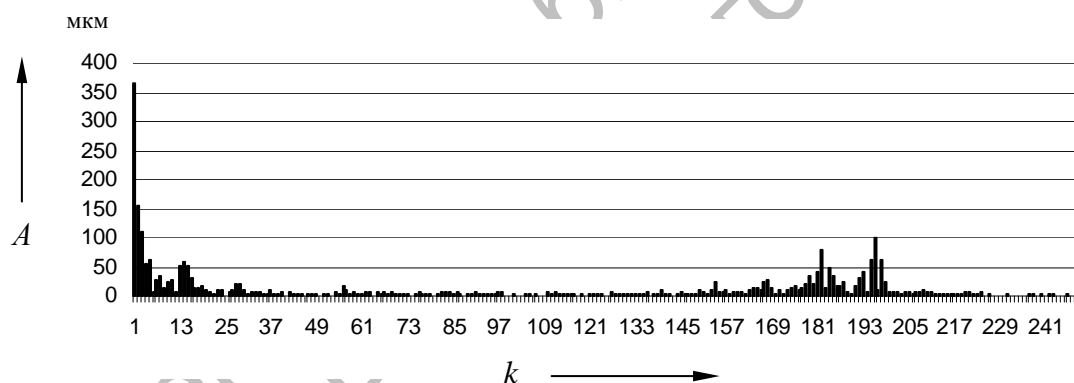


Рис. 7. Спектр амплитуд кинематической погрешности редуктора под нагрузкой 10 Н·м

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

На графике кинематической погрешности (см. рис. 6) четко просматривается однопериодная синусоида, выраженная в спектре амплитуд значением первой гар-

моники, 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 составляющие кинематической погрешности планетарного роликowego редуктора с $u = 14$ позволяет спектр амплитуд (см. рис. 7). Наиболее выражены гармоники с номерами 1, 2, 3, 12, 13, 14, 15, 26, 28, 182, 196. Анализ этих гармоник и установление их связей с погрешностями деталей редуктора и зазорами в зацеплении проведены при моделировании кинематических погрешностей

планетарных роликowych передач [3, 4].

На рис. 8 представлен график, характеризующий максимальные значения кинематических погрешностей при работе передачи при различных нагрузках на ведомом валу редуктора с $u = 14$, и линейная аппроксимация этих значений. Точки на графиках представляют максимальные значения кинематической погрешности, измеренной при различных нагрузках.

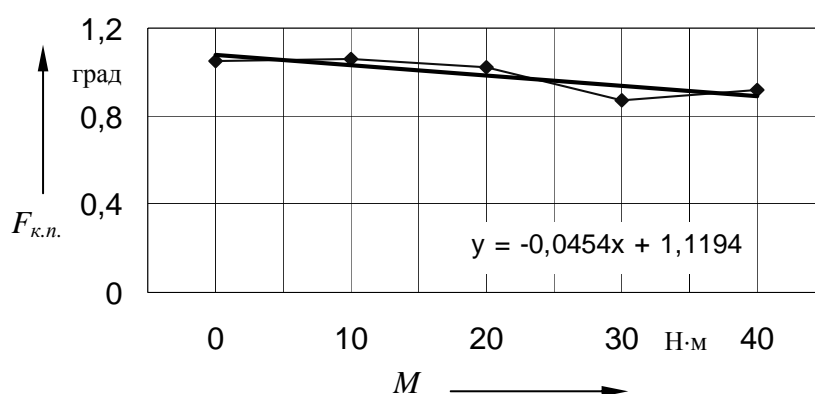


Рис. 8. Аппроксимация значений максимальной кинематической погрешности роликowego редуктора полиномом первой степени при работе передачи

На рис. 9 представлен график, показывающий влияние балансировки планетарного роликowego редуктора с $u = 11$ на кинематическую погрешность, на рис. 10 – спектр амплитуд кинематической погрешности этого редуктора. Балансировка проводилась грузами различной массы. Вес грузов подбирался и устанавливался таким образом, чтобы компенсировать дисбаланс от эксцентриситета ведущего звена и роликов. Балансировка значительно влияет на высокочастотные составляющие кинематической погрешности редуктора. Так, при различных весах грузов величина амплитуд гармоник с номером 152 и ближайших к ней неодинакова, при полном балансе (см. рис. 10) амплитуды этих гармоник незначительны. В области полного баланса кривые кинематической погрешности наиболее сглажены (см. рис. 9).

Экспериментальные исследования показали, что для опытных образцов редукторов с $u = 11$ и $u = 14$ при работе передачи кинематическая погрешность составляет 25...60 угл. мин.

Выводы

1. Разработанные методы контроля кинематических погрешностей планетарных роликowych передач могут быть использованы для контроля любых механических передач в сборе как в лабораторных, так и в производственных условиях.

2. Гармонический анализ показал, что в спектре амплитуд кинематических погрешностей планетарных роликowych передач можно выделить три основных диапазона частот: низкочастотный, обу-

словленный погрешностями деталей ведомого звена; среднечастотный, характеризующий погрешности деталей ведущего звена; высокочастотный, связанный с зазорами в зацеплении и дисбалансом ведущего звена. Получены численные значе-

ния кинематических погрешностей.

3. Установлено уменьшение высокочастотных составляющих кинематической погрешности планетарной роликовой передачи при балансировке.

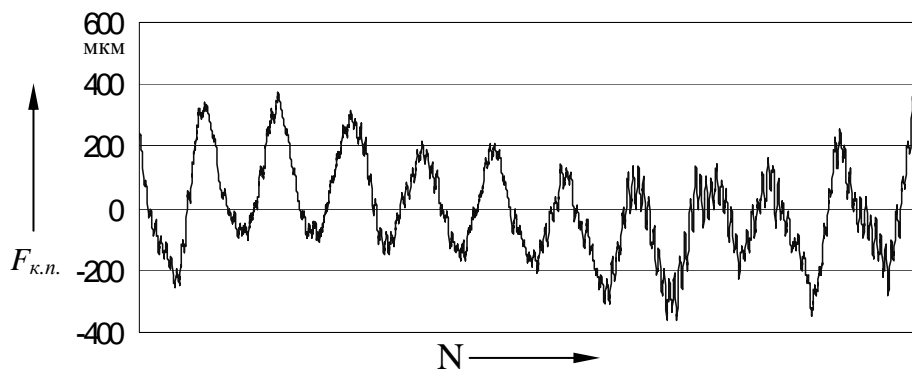


Рис. 9. График кинематической погрешности редуктора с $u = 11$ при балансировке

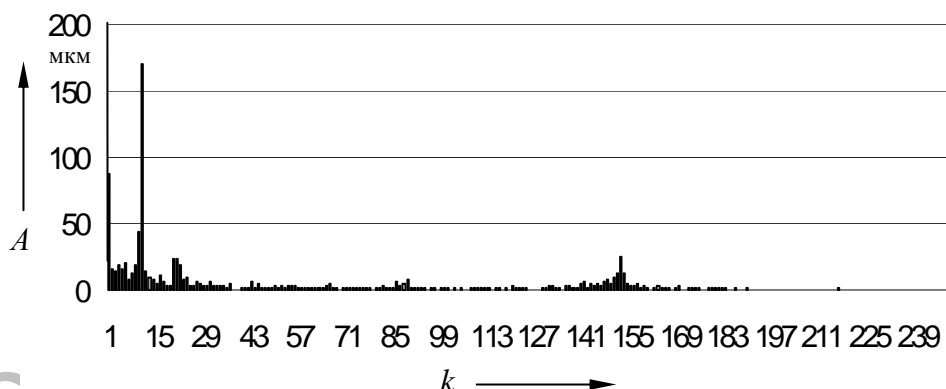


Рис. 10. Спектр амплитуд кинематических погрешностей редуктора с $u = 11$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашкевич, М. Ф. Планетарные шариковые и роликовые редукторы и их испытания / М. Ф. Пашкевич, В. В. Геращенко – Минск : БелНИИНТИ, 1992. – 248 с.

2. Новые методы и средства измерения кинематических погрешностей передач в сборе / М. Ф. Пашкевич [и др.]. – Могилев : МГТУ, 1999. – 17 с. – Деп. в БелИИСА 22.11.99. № 1999111 // Реф. сборник непубликуемых работ. – 2000. – Вып. 4 (15). – С. 100.

3. Капитонов, А. В. Математическое моделирование кинематических погрешностей планетарных роликовых передач / А. В. Капитонов // Вест. МГТУ. – 2003. – № 3. – С. 44–48.

4. Пашкевич, М. Ф. Кинематическая точность планетарных роликовых передач / М. Ф. Пашкевич, А. В. Капитонов. – Могилев : МГТУ, 1999. – 11 с. – Деп. в ВИНТИ 23.09.99. – № 2905-В99 // Журн. Изв. НАН Беларуси. – 2000. – № 1. – С. 152.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 10.12.2008

A. V. Kapitonov
Estimation methods and analysis of kinematical errors of planetary rolling screw motion drives

The work is dedicated to the methods of estimation of kinematical errors of planetary rolling screw motion drives on the basis of experimental research in statics and at work of the gear. The diagrams and spectra of amplitudes of kinematical errors of the gear have been received; the harmonic components of a spectrum have been analyzed. The influence of balancing of the gear on high-frequency harmonic components of kinematical error has been shown.

Электронная библиотека
Белорусско-Российского университета