
УДК 621.83.06

А. В. Капитонов, С. Г. Черняков, К. В. Сасковец, А. И. Касьянов

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ПЛАНЕТАРНЫХ ПЕРЕДАЧ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПРОФИЛЯ БЕГОВЫХ ДОРОЖЕК

UDC 621.83.06

A. V. Kapitonov, S. G. Chernyakov, K. V. Saskovets, A. I. Kasyanov

METHODS OF EXPERIMENTAL RESEARCH INTO KINEMATIC PRECISION OF PLANETARY TRANSMISSIONS WITH INTERMEDIATE ROLLING BODIES AND OF MONITORING THE PROFILE OF BEARING RACES

Аннотация

Разработан метод экспериментальных исследований кинематической точности механических передач с промежуточными телами качения на основе спектрального анализа. Предложена усовершенствованная конструкция автоматизированного стенда на базе информационно-измерительной системы для измерения кинематических погрешностей передач в сборе. Приведен метод контроля и оценки точности изготовленных профилей беговых дорожек сложной геометрической формы деталей передач с использованием координатно-измерительной машины.

Ключевые слова:

кинематическая точность, автоматизированный стенд, спектральный анализ, планетарная передача, беговая дорожка.

Abstract

The paper describes the developed method for studying experimentally the kinematic precision of mechanical transmissions having intermediate rolling bodies by using spectral analysis. An improved design of the automated stand, which is based on the information-measuring system, is presented for measuring kinematic errors in the transmission assembly. The paper presents the method to monitor and estimate the accuracy of manufactured profiles of bearing races of transmission parts having complex geometric shape, which uses the CMM.

Key words:

kinematic accuracy, automated stand, spectral analysis, planetary gearing, bearing race.

Введение

При исследованиях погрешностей механических передач, изложенных в [1–3], использовались два основных метода: приведение всех погрешностей изделия к единой системе отсчета и рассмотрение функционального характера ошибок колеса.

Система отсчета, разработанная для зубчатых передач, связана с наложенным на колесо вообразимым кон-

туром 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.

кобишо реткарах йыньланоицкнУФ при вращении звеньев механических

передач заключается в том, что погрешности, возникающие при изготовлении деталей зацепления, рассматриваются как функции угла поворота выходного звена передачи при ее работе и при контроле. Кинематическая погрешность передачи за полный оборот выходного звена (вала) представляет собой функцию погрешности угла поворота этого звена, учитывающую его неточности изготовления. Разложив данную функцию на гармонические составляющие с помощью рядов Фурье, по периоду гармоник и величинам амплитуд можно определить наиболее значимые гармоники и связанные с ними погрешности изготовления зубчатых колес. Именно гармонический анализ дает полное представление о конструкторских ошибках и технологических погрешностях, которые проявляются в работе передачи. Функциональный метод исследования неточностей механических передач позволяет через измерение кинематических погрешностей с использованием гармонического анализа связать в единую систему технологические, метрологические и эксплуатационные причины их возникновения.

Указанные методы представляются наиболее подходящими для исследования точности планетарных передач с промежуточными телами качения [4]. Для этих передач в качестве геометрических параметров, с которыми можно связать образование погрешностей, удобно принять радиус-вектор ρ и угол φ , определяющий положение радиус-вектора, однопериодной и многопериодной кривых беговых дорожек в полярных координатах. Пересечение кривых обуславливает положение центра сателлита. При этом радиус-векторы ρ для обеих кривых равны. Значение ρ определяется по формулам, представленным в [2–4]. При наличии кинематических погрешностей точка пересечения кривых перемещается относительно ее

номинального положения по дуге 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 кинематическую погрешность передачи.

Исследуемые передачи содержат в зацеплении детали различной геометрии и сложности. В зацеплении одновременно находится пять деталей разной конструкции, поэтому для этих передач наиболее приемлемым методом исследований является измерение общей ошибки передачи в сборе – ее кинематической погрешности и разложение данной погрешности на гармонические составляющие с последующим их анализом. Так как деталей в зацеплении планетарных передач с промежуточными телами качения шариками или роликами больше, чем в зубчатом зацеплении, то и значимых гармоник, характеризующих погрешности этих деталей, также больше, а зависимости между погрешностями более сложные, чем в зубчатых передачах.

Основная часть

При исследовании кинематической точности механических передач необходимо найти погрешности изготовления и упругие деформации деталей зацепления, которые влияют при работе передачи на ее точность. Основным параметром, определяющим кинематическую точность передачи, является погрешность угла поворота ведомого вала при равномерных углах поворота ведущего вала.

Для планетарных передач с промежуточными телами качения шариками или роликами при исследовании их погрешностей был принят такой же подход, как и для зубчатых, который заключается в рассмотрении погрешностей передачи в тесной связи со способом изготовления ее деталей и

проявлением этих погрешностей при ее работе.

При анализе гармонических составляющих функции кинематической погрешности передачи необходимо учитывать тот факт, что амплитуда каждой гармоники включает как радиальные, так и тангенциальные технологические погрешности. Радиальные погрешности возникают вследствие несовпадения осей вращения деталей зацепления, что приводит к появлению дополнительного эксцентриситета и радиальному биению деталей передачи. Причинами тангенциальных погрешностей являются неточности изготовления шага периодов беговых дорожек, по которым перемещаются сателлиты шарики или ролики [1, 3].

Существующие 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 передач с промежуточными телами качения, для которых необходим контроль в сборе [2, 3, 5–7].

Для оценки кинематических погрешностей механических передач на кафедре «Технология машиностроения» Белорусско-Российского университета разработана усовершенствованная конструкция стенда, описанного в [5, 8]. В этой конструкции применяются два преобразователя угловых перемещений. Первый стандартный преобразователь ВЕ 178А, снабженный оптическим формирователем импульсов с числом отсчетов за оборот $N = 2500$, установлен на входном валу; второй, модели Autonic E50 8-8000-3-T-24 ($N = 8000$), – на выходном. Два преобразователя угловых перемещений позволяют исключить неравномерность вращения вала электродвигателя и входного вала передачи и тем самым уменьшить погрешность измерения и повысить точность полученных результатов. На стенде к вы-

ходному валу испытуемого редуктора присоединен электромагнитный тормоз, который дает возможность исследовать изменение кинематической погрешности передачи при различных нагружаемых моментах, моделирующих эксплуатационные условия.

Экспериментальные исследования кинематической точности передач проводились как без нагрузки на выходном валу, так и при нагрузке 20, 40, 60, 80 Н·м. В результате измерений на стенде были получены графики и спектры амплитуд значений кинематических погрешностей за равные промежутки времени с помощью программы Shark, входящей в программное обеспечение стенда. На рис. 1 показано окно программы Shark, в котором получен график кинематических погрешностей двухступенчатого радиально-плунжерного редуктора с передаточным отношением 49 после снятия сигнала без нагрузки.

В программе Shark предварительно устанавливались следующие параметры: 2500 импульсов (отсчетов) для энкодера за полный оборот входного вала; 8000 импульсов (отсчетов) для энкодера за полный оборот выходного вала; 512 гармоник для амплитудно-частотного спектра; передаточное число редуктора $u = 49$, согласовывающее работу датчиков, установленных на входном и выходном валах редуктора.

На рис. 2 представлен график кинематических погрешностей за полных три оборота выходного вала планетарного радиально-плунжерного шарикового редуктора с передаточным отношением 49 без нагрузки на выходном звене, а на рис. 3 – амплитудно-частотный спектр из 20 первых наиболее значимых гармоник распределения значений, приведенных на графике (рис. 2). График (см. рис. 2) и спектр (см. рис. 3) получены после снятия значений кинематических погрешностей на стенде в радианах и преобразования их в единицы измерения градусы.

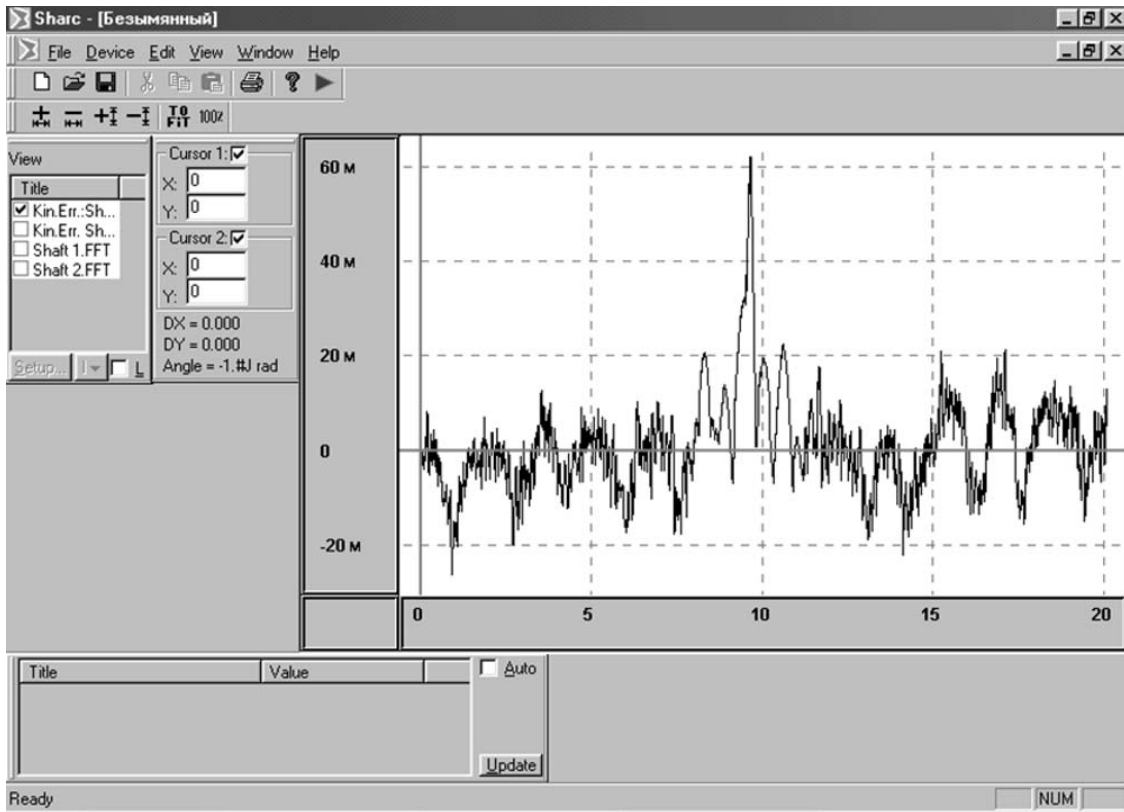


Рис. 1. Окно программы Shark с результатами измерений кинематических погрешностей передачи на стенде

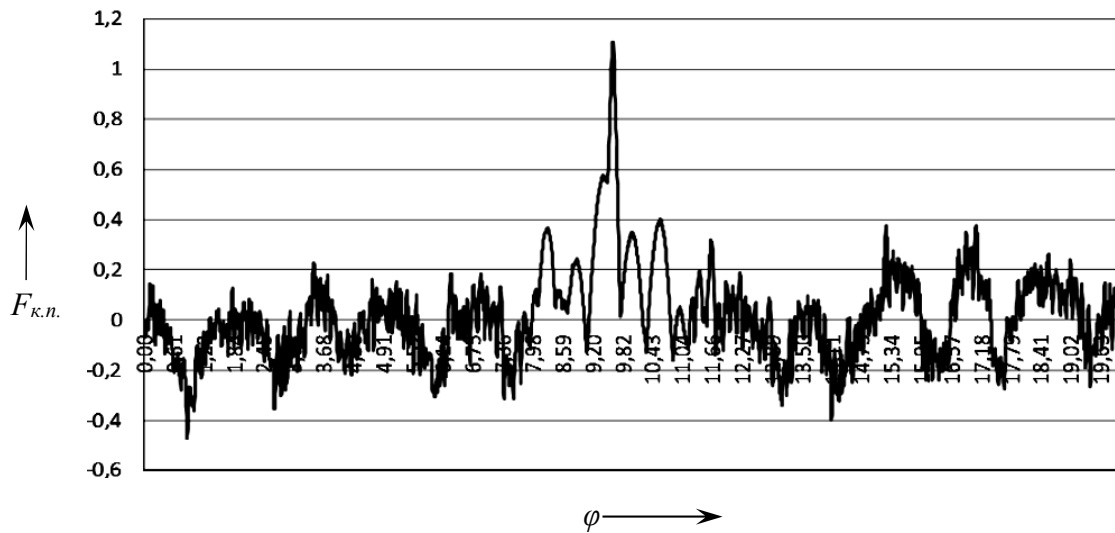


Рис. 2. График кинематических погрешностей планетарного радиально-плунжерного редуктора с передаточным отношением 49 при работе без нагрузки: φ – угол поворота; $F_{к.п.}$ – кинематическая погрешность

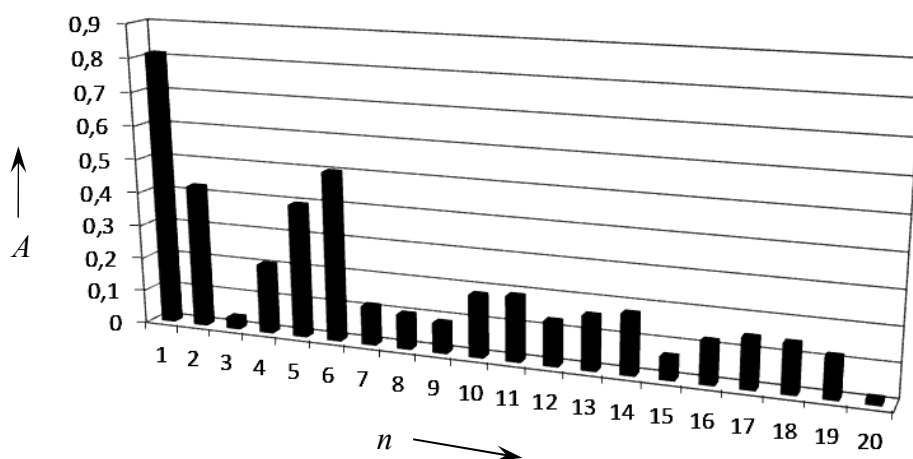


Рис. 3. Амплитудно-частотный спектр кинематических погрешностей планетарного радиально-плунжерного редуктора с передаточным отношением 49 при работе без нагрузки: n – номер гармоники; A – амплитуда

На рис. 4 и 5 представлены амплитудно-частотные спектры кинематических погрешностей планетарной передачи с промежуточными телами качения роликами [2] за полный оборот выходного вала при работе редуктора без нагрузки и под нагрузкой 40 Н·м. Амплитудно-частотные спектры наиболее полно характеризуют кинематическую точность и плавность работы передач,

при этом гармоники с первыми номерами (низкочастотный участок спектра) характеризуют кинематическую точность, а гармоники с номерами, равными числу периодов дорожек, передаточному отношению и находящимися рядом с ними (среднечастотный участок спектра) и кратными им (высокочастотный участок спектра), – плавность работы передачи.

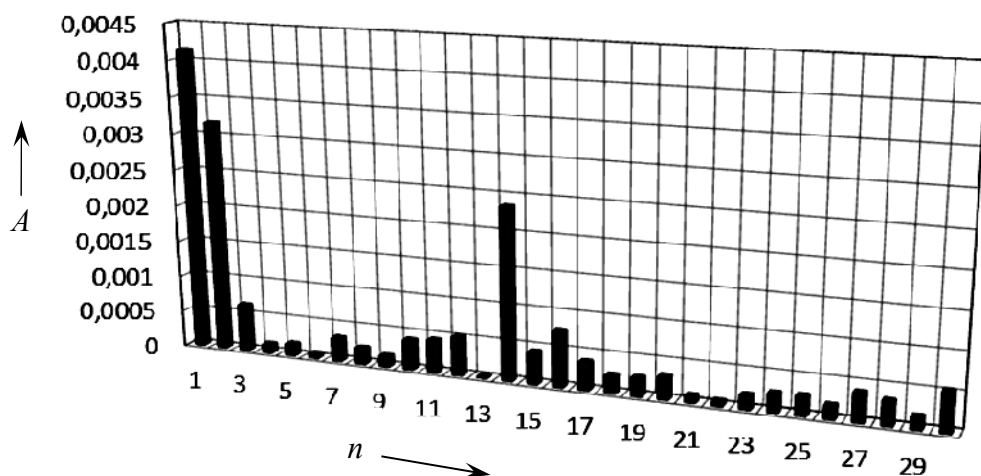


Рис. 4. Амплитудно-частотный спектр кинематических погрешностей планетарного роликового редуктора с передаточным отношением 14 при работе без нагрузки: n – номер гармоники; A – амплитуда

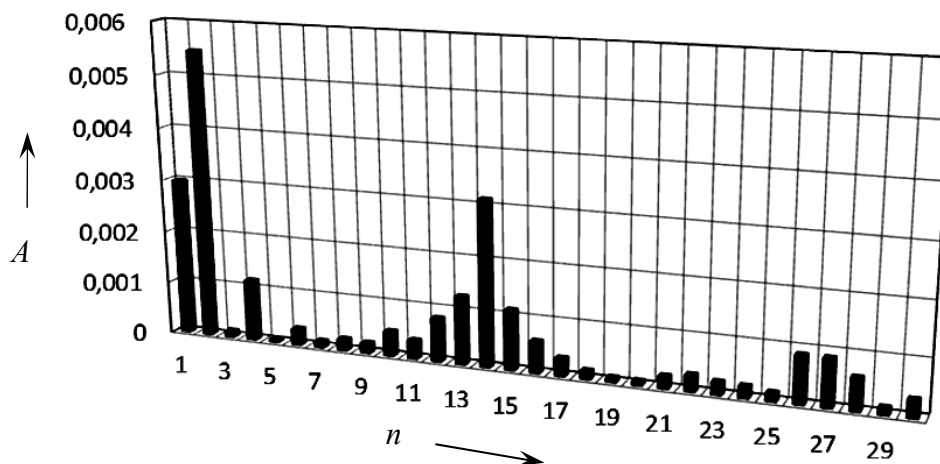


Рис. 5. Амплитудно-частотный спектр кинематических погрешностей планетарного роликowego редуктора с передаточным отношением 14 при работе под нагрузкой 40 Н·м: n – номер гармоники; A – амплитуда

Спектры амплитуд получены, используя метод преобразования Фурье, математические зависимости которого представлены в [2, 3, 9]. Анализируя графики и спектры, можно установить конструктивные и геометрические неточности проектирования и изготовления деталей редуктора, которые в большей степени влияют на кинематическую погрешность передачи.

На графике кинематических погрешностей передачи (см. рис. 2) просматривается многопериодная синусоида, число периодов которой выражено в спектре (см. рис. 3) значениями амплитуд пятой и шестой гармоник, значительно превышающими значения амплитуд остальных гармоник с номерами больше шести. Также на графике (см. рис. 2) видно проявление местных погрешностей высокой частоты синусоидальных колебаний.

На некоторых участках график (см. рис. 2) представляет собой вытянутую сглаженную линию, что связано с погрешностями, имеющими случайный характер за период вращения выходного вала, а также с ошибками оборудования при измерениях на стенде.

Оценить причины кинематических погрешностей редукторов позво-

ляют амплитудно-частотные спектры (см. рис. 3...5). В спектрах при различных нагрузках на ведомом валу, так же, как и без нагрузки, выделяются три участка гармоник с наибольшими значениями амплитуд. Это низкочастотный участок (гармоники с первыми номерами), среднечастотный (гармоники с номерами, близкими к передаточному числу) и высокочастотный (гармоники с номерами, кратными среднечастотным гармоникам). При этом значения амплитуд данных частотных диапазонов гармоник с увеличением нагрузки, как правило, возрастают. Это связано с упругими деформациями, которые возникают в звеньях редукторов при нагружении выходного вала с помощью электромагнитного тормоза и увеличивают кинематическую погрешность передачи.

Основными причинами образования гармоник с первыми номерами являются: отклонение расположения пазов и осей отверстий водила (фланца выходного вала); зазоры и эксцентриситеты в сопряжениях деталей ведомого звена при сборке; биение подшипников, установленных на выходном валу. Номера гармоник, равные передаточным числам и кратные им, характеризуют погрешности изготовления деталей и сборки ведущих звеньев передач

(погрешности шага и профиля беговых дорожек, радиальные биения поверхностей деталей зацепления) и проявляются при вхождении сателлитов в зацепление как циклические погрешности, повторяющиеся многократно за полный оборот выходного вала.

Значения наибольшей кинематической погрешности разработанных конструкций передач при проведении экспериментальных исследований составили от 0,25 до 0,65 град для редукторов в сборе, что соответствует 7...9 степеням точности зубчатых передач с учетом их полной сборки с подшипниками, валами и корпусом. Такая точность отвечает следующей классификации зубчатых колес: передачи точные (7 степень); средней точности (8 степень); пониженной точности (9 степень) [1]. К наиболее точным из разработанных и исследуемых конструкций относятся планетарные передачи с промежуточными телами качения шариками или роликами торцового типа, построенные на основе шестой кинематической схемы в соответствии с классификацией, представленной в [4], и имеющие небольшое число периодов беговых дорожек (не более 10 периодов).

Оценка точности профилей дорожек выполнялась на основе разработанного метода контроля поверхностей сложной геометрической формы и методики компьютерного 3D-моделирования погрешностей изготовления деталей передач. Для контроля геометрической точности профиля рабочих поверхностей беговых дорожек планетарных шариковых и роликовых передач использовалась координатно-измерительная машина (КИМ) фирмы Carl Zeiss Dura-Max 5/5/5 с программным обеспечением Calypso, изображенная на рис. 6. С помощью КИМ измерения проводились в нескольких плоскостях, проходящих перпендикулярно рабочим поверхностям дорожек, и были получены координаты опорных точек кривых, образующих поверхности этих дорожек,

которые выводились в ASCII-файл. Затем координаты точек кривых, описывающих реальный профиль, с помощью CAD-программы сопоставлялись с координатами построенного идеального профиля кривых и определялись погрешности изготовления как наибольшая разность между реальным и номинальным профилями. На рис. 7 показано CAD-окно программы Calypso координатно-измерительной машины. В этом окне представлена кривая, характеризующая реальный профиль изготовленной беговой дорожки детали зацепления планетарного роликового редуктора. Кривая получена после измерения щупом в одной плоскости с заданным шагом. На рис. 8 изображен фрагмент файла вывода точек кривой.

На рис. 9 показана разработанная и построенная компьютерная модель диска планетарного роликового редуктора с многопериодной беговой дорожкой, имеющей идеальный профиль (без погрешностей изготовления) и шесть периодов. По дорожке, геометрические параметры которой представлены в [2–4], перемещаются ролики при работе передачи.

Заключение

1. Разработан метод проведения экспериментальных исследований кинематической точности механических передач с промежуточными телами качения на основе спектрального анализа. Усовершенствована конструкция автоматизированного стенда на базе информационно-измерительной системы для измерения кинематических погрешностей передач в сборе.

2. В результате разработанных методов и средств получены амплитудно-частотные спектры, позволяющие установить причинно-следственную связь между погрешностями изготовления, упругими деформациями и гармоническими составляющими кинематических погрешностей, значения которых можно уменьшить при изготовлении и сборке и

повысить эксплуатационные характеристики передач.

3. Разработан метод контроля и оценки точности изготовленных профилей беговых дорожек сложной геомет-

рической формы деталей передач с использованием координатно-измерительной машины. Метод позволяет оценить влияние погрешностей профиля на кинематическую точность передач.



Рис. 6. Координатно-измерительная машина фирмы Carl Zeiss DuraMax (инв. № 01384334, дата поверки 17.05.2013 г.)

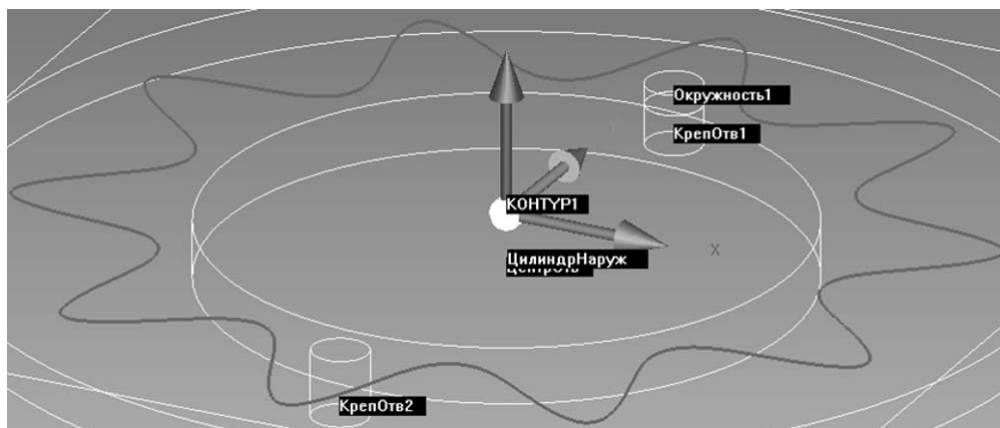


Рис. 7. Результаты измерений профиля беговой дорожки на координатно-измерительной машине

| xNom | yNom | zNom | x | y | z |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 45.8046 | 0.2562 | -1.2319 | 45.6852 | 0.2633 | -1.2800 |
| 45.9275 | -0.5403 | -1.2402 | 45.8240 | -0.5858 | -1.2878 |
| 45.9059 | -0.7960 | -1.2581 | 45.8703 | -0.8064 | -1.2870 |
| 45.9724 | -1.3365 | -1.3241 | 46.0576 | -1.3072 | -1.2857 |
| 46.1746 | -1.9665 | -1.3549 | 46.3652 | -1.8689 | -1.2846 |
| 46.3783 | -2.5840 | -1.2226 | 46.6935 | -2.3590 | -1.2839 |
| 46.4610 | -2.9201 | -1.3477 | 46.9313 | -2.6796 | -1.2836 |
| 46.7726 | -3.5684 | -1.3556 | 47.3047 | -3.1475 | -1.2832 |
| 47.0964 | -4.0905 | -1.3297 | 47.6429 | -3.5459 | -1.2830 |
| 47.3619 | -4.5158 | -1.2736 | 47.9694 | -3.9142 | -1.2828 |
| 47.6970 | -4.9814 | -1.3101 | 48.3097 | -4.2853 | -1.2827 |
| 47.9018 | -5.2941 | -1.3179 | 48.6335 | -4.6291 | -1.2827 |
| 48.2991 | -5.7551 | -1.2767 | 48.9891 | -4.9980 | -1.2827 |
| 48.6759 | -6.1814 | -1.2774 | 49.3385 | -5.3538 | -1.2827 |
| 49.1324 | -6.6290 | -1.2950 | 49.6931 | -5.7091 | -1.2828 |
| 49.6224 | -7.0448 | -1.2961 | 50.0561 | -6.0682 | -1.2828 |

Рис. 8. Фрагмент файла вывода точек периодической кривой беговой дорожки

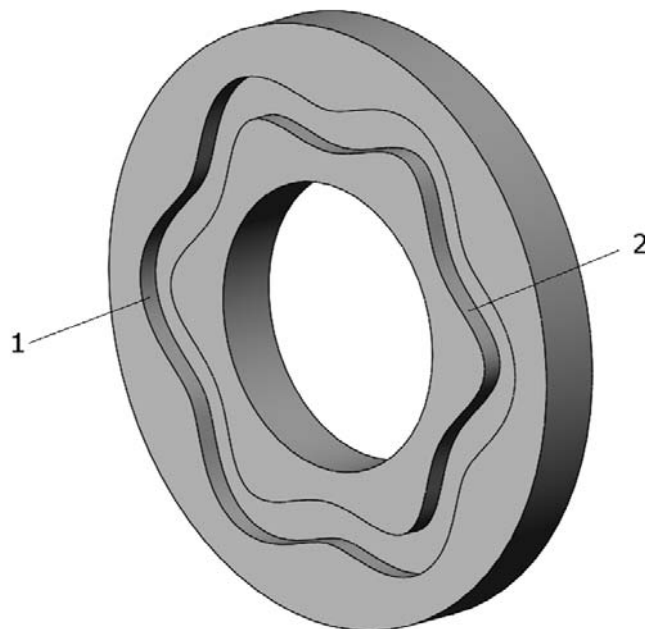


Рис. 9. Компьютерная модель диска с многопериодной дорожкой: 1 – наружная рабочая поверхность дорожки; 2 – внутренняя рабочая поверхность дорожки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тайц, Б. А.** Точность и контроль зубчатых колес / Б. А. Тайц. – М.: Машиностроение, 1972. – 367 с.
2. **Капитонов, А. В.** Исследование кинематической точности планетарных роликовых передач методами гармонического анализа и контроля в сборе / А. В. Капитонов, С. Г. Черняков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 4. – С. 40–50.
3. Исследование кинематической погрешности планетарного эксцентрикового редуктора / А. В. Капитонов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 3. – С. 14–24.

4. Планетарные кулачково-плунжерные передачи. Проектирование, контроль и диагностика / М. Ф. Пашкевич [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2003. – 221 с.
5. Управление точностью планетарных роликовых передач на основе их моделирования и спектрального анализа кинематических погрешностей / М. Ф. Пашкевич [и др.] // Изв. Белорус. акад. наук. – 2002. – № 1 (13). – С. 45–52.
6. **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.
7. **Капитонов, А. В.** Методика оценки и анализ кинематических погрешностей планетарных роликовых передач / А. В. Капитонов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 2. – С. 88–97.
8. **Капитонов, А. В.** Исследование эксплуатационных характеристик планетарных эксцентриковых передач с модифицированным профилем зубьев / А. В. Капитонов, В. М. Пашкевич // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. – 2015. – № 3 (47). – С. 34–39.
9. **Толстов, Г. П.** Ряды Фурье / Г. П. Толстов. – М. : Наука, 1980. – 384 с.

Статья сдана в редакцию 21 марта 2016 года

Александр Валентинович Капитонов, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-298-36-97-41.

Сергей Геннадьевич Черняков, инженер, Белорусско-Российский университет.

Константин Валерьевич Сасковец, студент, Белорусско-Российский университет.

Артем Игоревич Касьянов, студент, Белорусско-Российский университет.

Aleksandr Valentinovich Kapitonov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
Phone: +375-298-36-97-41.

Sergey Gennadyevich Chernyakov, engineer, Belarusian-Russian University.

Konstantin Valeryevich Saskovets, student, Belarusian-Russian University.

Artem Igorevich Kasyanov, student, Belarusian-Russian University.