

2. Vybor i primeneniye materialov : uchebnoye posobie, T,3, Vybor i primeneniye spetsial'nykh staley i splavov / N, A, Svidunovich [idr.], – Minsk : Belaruskaya navuka, 2019. – 529 c.
3. Kachanov E. B. Metody spetsmetallurgii. – osnova proizvodstva vysokokachestvennykh staley i splavov / E. B. Kachanov // Stal. – 2088, № 12. – S. 81–83.
4. Lushchik, P. E. Opredeleniye parametrov kinetiki zatverdevaniya i modelirovaniye liteynykh protsessov pri poluchenii otlivok iz modifitsirovannykh splavov: Avtoref, dis, kand, tekhn, nauk, – Minsk, 2018. – 26 s.
5. Otto, F.; Yang, Y.; Bei, H.; George, E. P. (April 2013), "Relative effects of enthalpy and entropy on the phase stability of equiatomic high-entropy alloys", Acta Materialia, 61 (7): 2628–2638,
6. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes / J.-W, Yeh, S.-K, Chen, S.-J, Lin, J.-Y, Gan, T.- S, Chin, T.-T, Shun, C.-H, Tsau, S.-Y, Chang // Advanced Engineering Materials, – 2004, – Vol, 6, – P, 299–303, – DOI: 10,1002/adem,200300567,
7. Andrushevich A. A. Kalinichenko V. A. Osobennosti polucheniya kompozitsionnykh materialov s matritsei na osnove medi Materialy MNTK «Belagro-2019», Sovremennyye problemy osvoeniya novoy tekhniki, tekhnologii, organizatsii tekhnicheskogo servisa v APK, – Minsk: BGATU, 06-07,06,2019, S,151-156,
8. Rogachev A. S. Struktura, stabil'nost' i svoystva vysokoentropiynykh splavov // Fizika metallov i metallovedeniye, – 2020, – T, 121, № 8, – S, 807– 841,
9. Bashev V. F. Kushnerev A. I. Struktura i svoystva vysokoentropiynogo splava CoCrCuFeNiSnx // Fizika metallov i metallovedeniye, – 2014, – T, 115, №7, – C,737–741,

УДК 621.83.06

## **МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПРОФИЛЯ БЕГОВЫХ ДОРОЖЕК ПЛАНЕТАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ С ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ**

*А. В. Капитонов, к. т. н., доцент, доцент кафедры технология машиностроения, Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь, e-mail: kavbru@gmail.com*

### **Реферат**

В статье рассмотрены вопросы оценки точности изготовления и контроля профиля беговых многопериодных дорожек планетарных редуцирующих механизмов с телами качения. Разработаны методы оценки точности профиля многопериодной дорожки с использованием технологии координатных измерений на координатно-измерительной машине. Методы заключаются в измерении изготовленного реального профиля многопериодной дорожки с некоторым линейным шагом, получении массива координат точек профиля в результате измерений и проведении вычислений погрешностей профиля дорожки в соответствии с назначенными показателями точности, характеризующими угловое положение координат точек и линейное отклонение профиля дорожки. Разработаны компьютерные программы для обработки экспериментальных результатов измерений и расчета погрешностей, определяющих точность профиля многопериодной дорожки. Для оценки влияния точности изготовления профиля беговых дорожек на кинематическую погрешность планетарных механизмов с телами качения использовался гармонический анализ с построением амплитудно-частотных спектров кинематических погрешностей установленных показателей.

**Ключевые слова:** беговая многопериодная дорожка, методы оценки точности, показатели точности, планетарные передачи.

# METHODS FOR EVALUATING THE ACCURACY OF THE TREADMILL PROFILE OF PLANETARY MECHANISMS WITH ROLLING ELEMENTS

A. V. Kapitonov

## Abstract

The article deals with the issues of evaluating the accuracy of manufacturing and control of the profile of large multi-period tracks of planetary reducing mechanisms with bodies of quality. Methods for estimating the accuracy of the multi-period track profile using coordinate measurement technology on a coordinate measuring machine have been developed. The methods consist in measuring the manufactured real profile of a multi-period track with a certain linear step, obtaining an array of coordinates of profile points as a result of measurements and calculating errors of the track profile in accordance with the assigned accuracy indicators characterizing the angular position of the coordinates of the points and the linear deviation of the track profile. Computer programs have been developed for processing experimental measurement results and calculating errors that determine the accuracy of the multi-period track profile. To assess the effect of the manufacturing accuracy of the treadmill profile on the kinematic error of planar mechanisms with rolling elements, a harmonic analysis was used with the construction of amplitude-frequency spectra of kinematic errors of installed indicators.

**Keywords:** multi-period treadmill, accuracy assessment methods, accuracy indicators, planetary transmissions.

## Введение

Многопериодные беговые дорожки планетарных передач с телами качения являются важными элементами их конструкции [1–4]. Они в наибольшей степени влияют на эксплуатационные характеристики передачи и поэтому к ним предъявляются высокие требования геометрической точности профиля, так как по поверхностям дорожек перемещаются сателлиты – шарики или ролики. Периодический профиль дорожки может быть образован фрезерованием концевой фрезой на обрабатывающих центрах. При фрезеровании ось фрезы перемещается по периодической кривой.

Известны методы контроля точности изготовления зубчатых колес [5–7]. Для них разработаны нормы и показатели точности с таблицами допусков, представленных в стандартах. Эти методы контроля приняты за основу для создания методов оценки точности планетарных передач с телами качения, для которых разрабатываются показатели точности, соответствующие особенностям их геометрии и кинематики. В настоящее время проводятся исследования точности различных механических передач, как с эвольвентным зацеплением, так и с профилями деталей зацепления в виде синусоид, циклоид и других кривых [8–14]. Большое количество работ в данном направлении подтверждает актуальность исследований точности механических передач. Однако в этих исследованиях нет разработок норм, показателей и допусков для контроля точности новых типов механических передач. Поэтому для планетарных механизмов с телами качения, для повышения их технического уровня, была поставлена

и решена задача, связанная с разработкой методов оценки точности и показателей точности на основе методов измерения и гармонического анализа погрешностей изготовления.

Разработаны методы оценки точности изготовления профиля многопериодной дорожки с использованием технологии координатных измерений на координатно-измерительной машине (КИМ) DuraMax (Zeiss) [15–18]. Методы заключаются в измерениях на КИМ изготовленного реального профиля многопериодной дорожки с некоторым линейным шагом, получении массива координат точек профиля в результате измерений и проведении вычислений погрешностей профиля дорожки в соответствии с назначенными показателями точности, характеризующими угловое положение координат точек и линейное отклонение профиля дорожки. В среде VBA Excel разработаны компьютерные программы для обработки экспериментальных результатов измерений и расчета погрешностей, определяющих точность профиля многопериодной дорожки. Для оценки влияния точности изготовления профиля беговых дорожек на кинематическую погрешность планетарных механизмов с телами качения использовался гармонический анализ с построением амплитудно-частотных спектров кинематических погрешностей установленных показателей беговых дорожек.

На рисунке 1 представлена координатно-измерительная машина Carl Zeiss DuraMax 5/5/5 с программным обеспечением Calypso, которая использовалась для экспериментальной оценки точности многопериодных дорожек планетарных передач с промежуточными телами качения.

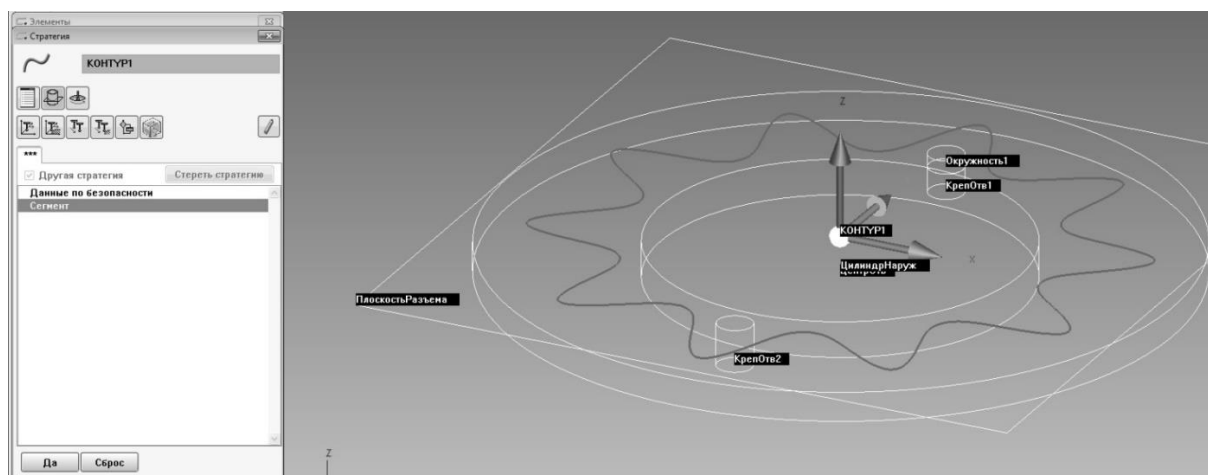


*Рисунок 1 – Координатно-измерительная машина DuraMax 5/5/5*

## **Разработка методики измерений методом сканирования и оцифровки криволинейных поверхностей деталей с многопериодными дорожками с выводом координат опорных точек.**

Разработана методика сканирования криволинейных поверхностей детали с некоторым заданным линейным шагом точек кривой. Координаты точек определялись следующим образом. Щуп координатно-измерительной машины, соприкасаясь с изготовленной многопериодной дорожкой и перемещаясь по ней, сканировал ее поверхность. С помощью встроенного программного обеспечения Calypso КИМ создает точки реального (изготовленного) профиля многопериодной дорожки, с заданным при предварительной настройке шагом, координаты которых записываются в автоматическом режиме в текстовый файл. Полученные точки (в зависимости от протяженности кривой и дискретности шага) могут быть выведены в текстовый ASCII-файл, либо на печать. Координаты точек, выведенные в ASCII-файл, используются для построения реального профиля кривой, например, в CAD-программе с целью дальнейшего наложения на график идеального профиля кривой и определения погрешностей изготовления, как наибольшей разности между реальным и номинальным профилями.

Опорные точки кривой, соответствующей криволинейной поверхности детали, создаются элементом программы Calypso «Кривая». В CAD-окне программы Calypso задается скорость сканирования (2 или 3 мм/с), длина шага, прямоугольная система координат, стартовая и конечная точки кривой, толщина щупа радиусом 2,5 или 3 мм, пространственная ось – Z, направление обхода кривой. По окончании сканирования в CAD-окне Calypso создается кривая (рисунок 2).



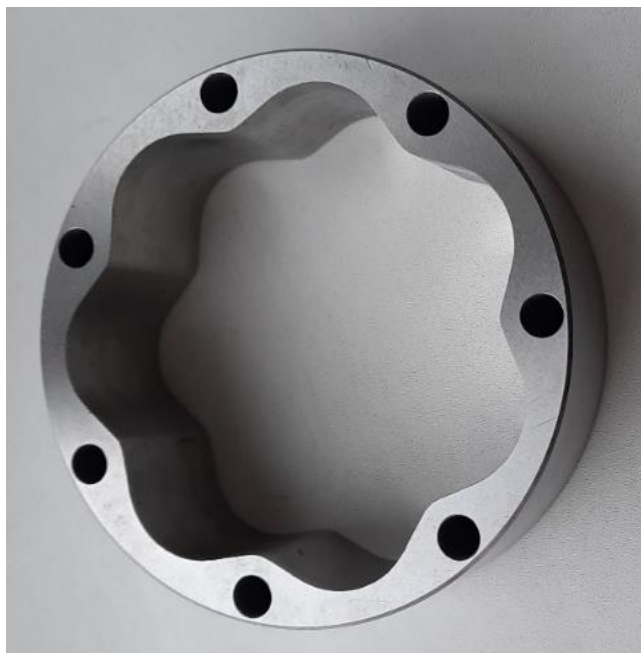
**Рисунок 2 – Кривая профиля многопериодной дорожки детали планетарной передачи**

Данная кривая представляет собой траекторию перемещения центра щупа, то есть является эквидистантой реальной кривой после редактирования значений координат щупа на величину его радиуса.

**Разработка метода и показателей для оценки точности углового положения координат точек профиля многопериодных дорожек после изготовления.**

На рисунке 3 показано кольцо с многопериодной дорожкой, которое входит в конструкции планетарных радиально-плунжерных шариковых редукторов

с передаточными отношениями  $i = 8$  (одноступенчатый редуктор) и  $i = 64$  (двухступенчатый редуктор) [18, 19]. В двухступенчатом редукторе в конструкцию входит два кольца с многопериодной дорожкой в каждой ступени. Детали с многопериодными дорожками в виде колец изготовлены из легированной стали 40X. Периодический профиль дорожки образован фрезерованием концевой фрезой на обрабатывающем центре Mazak Smart 100. При фрезеровании ось фрезы может перемещаться по кривым в виде синусоиды, циклоиды, смещенной окружности или другим кривым с периодическим профилем, замкнутым на плоскости [20]. На рисунке 4 поверхность многопериодной дорожки имеет упрощенный периодический профиль, при этом деталь имеет более технологичную форму профиля дорожки. Профиль криволинейной поверхности этой детали представляет собой сочетание окружностей радиусом 17 мм и прямых с углом наклона 46 градусов, равным наибольшему углу подъема номинальной кривой. Профиль является менее затратным при проектировании и изготовлении.



*Рисунок 3 – Кольцо с многопериодной дорожкой*

Разработан метод для контроля и оценки точности изготовления многопериодных дорожек с установлением показателей точности, характеризующих угловые положения координат точек после изготовления многопериодной дорожки. Метод заключается в измерении путем сканирования и оцифровки криволинейных поверхностей деталей с многопериодными дорожками по разработанной методике и установлении угловых показателей точности. Получено 3272 точки, описывающие реальный профиль многопериодной дорожки после изготовления. Координаты полученных точек использовались в дальнейшем при расчете показателей точности.

**Показатели точности углового положения координат точек профиля многопериодных дорожек.**

Для контроля и оценки точности изготовления деталей с многопериодными дорожками разработаны и предложены показатели, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Геометрические и кинематические показатели точности беговой многопериодной дорожки (МД)

Название показателя	Обозначение показателя
Геометрический показатель	
Координаты действительных (экспериментальных) точек профиля МД	$X_d$ и $Y_d$
Радиус-вектор действительной (экспериментальной) точки профиля МД	$\rho_d$
Средний радиус-вектор действительной (экспериментальной) точки профиля МД	$\rho_{д,ср}$
Действительный (экспериментальный) угол между двумя точками профиля МД с координатами $X_d, Y_d$	$\varphi_d$
Кинематический показатель	
Действительный угловой шаг точек профиля МД	$\Delta\varphi_d$
Номинальный средний угловой шаг точек профиля МД	$\Delta\varphi_{н,ср}$
Номинальный переменный угловой шаг точек профиля МД	$\Delta\varphi_{н,пер}$
Отклонение углового шага точек профиля МД	$\Delta\varphi_{проф}$
Накопленная погрешность углового шага точек профиля МД	$\Delta\varphi_{проф}^{нак}$
Номинальный переменный накопленный угловой шаг точек профиля МД	$\Delta\varphi_{н,пер}^{нак}$
Кинематическая погрешность МД	$F_{к.п}^{МД}$

Геометрические показатели многопериодной дорожки определяются по соотношениям

$$\rho_d = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2}; \quad (1)$$

$$\rho_{д,ср} = (\rho_{д(i+1)} + \rho_{д(i)})/2, \quad (2)$$

где  $i$  – номер измеряемой точки профиля МД,  $i = 1, 2, 3 \dots n$ ;  $n$  – число измеренных точек профиля МД;

$$\varphi_d = \arctg \frac{Y_d}{X_d}. \quad (3)$$

Кинематические показатели многопериодной дорожки определяются по соотношениям

$$\Delta\varphi_{д(i)} = \varphi_{д(i+1)} - \varphi_{д(i)} = \arctg\left(\frac{Y_d}{X_d}\right)_{i+1} - \arctg\left(\frac{Y_d}{X_d}\right)_i, \quad i = 1, 2, 3 \dots n - 1; \quad (4)$$

$$\Delta\varphi_{н,ср} = \frac{2\pi}{n}; \quad (5)$$

$$\Delta\varphi_{н,пер} = \frac{l}{\rho_{д,ср}} - C, \quad (6)$$

где  $C$  – постоянная, учитывающая разность между номинальным средним угловым шагом и номинальным переменным угловым шагом точек профиля МД;  $l$  – шаг перемещения щупа КИМ,  $l = 0,1$  мм;

$$\Delta\varphi_{\text{проф}} = \Delta\varphi_{\text{д}} - \Delta\varphi_{\text{н.пер}}; \quad (7)$$

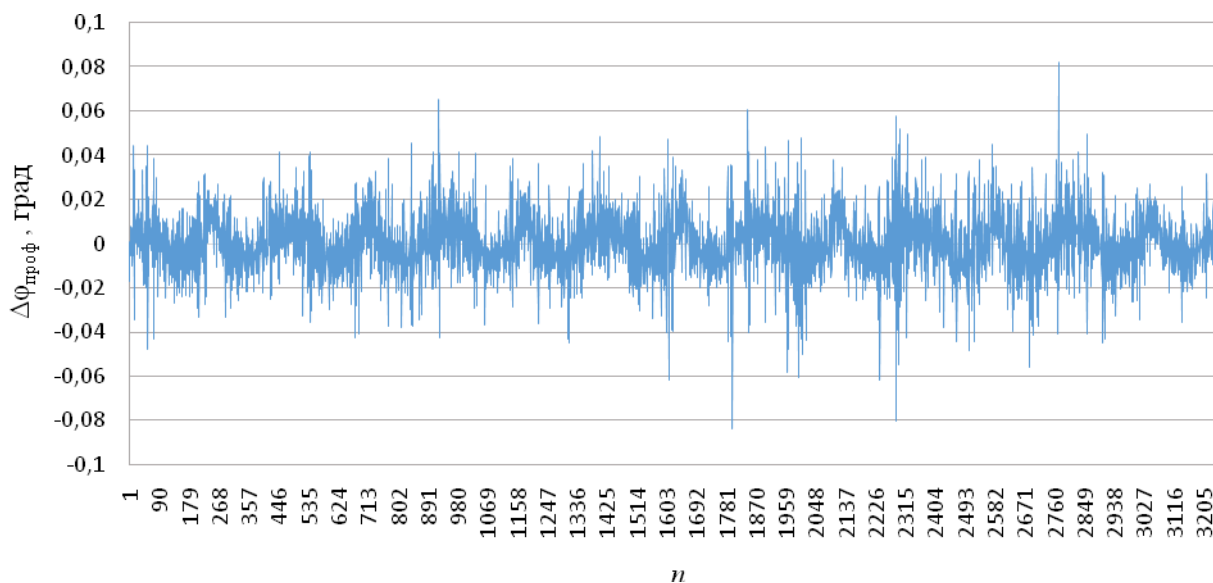
$$\Delta\varphi_{\text{проф}(i)}^{\text{нак}} = \Delta\varphi_{\text{проф}(i)} + \Delta\varphi_{\text{проф}(i-1)}^{\text{нак}}, \quad i = 1, 2, 3 \dots n; \quad (8)$$

$$\Delta\varphi_{\text{н.пер}(i)}^{\text{нак}} = \Delta\varphi_{\text{н.пер}(i)} + \Delta\varphi_{\text{н.пер}(i-1)}^{\text{нак}}, \quad i = 1, 2, 3 \dots n; \quad (9)$$

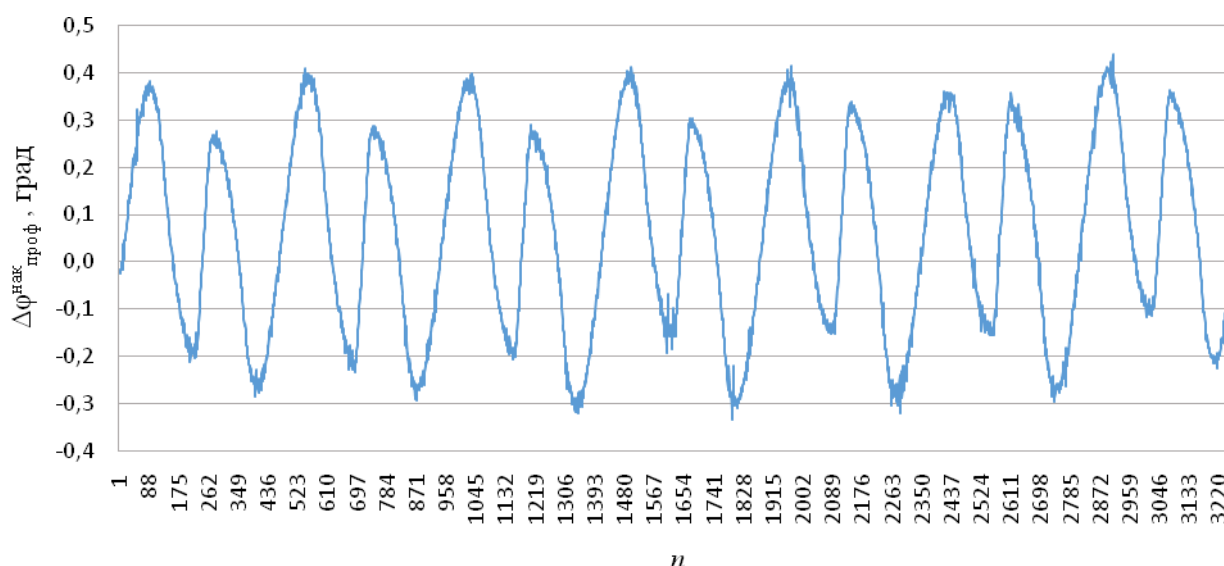
$$F_{\text{к.п}}^{\text{МД}} = \varphi_{\text{д}} - \Delta\varphi_{\text{н.пер}}^{\text{нак}}. \quad (10)$$

При расчетах кинематических параметров учитывался номинальный переменный угловой шаг точек профиля дорожки в зависимости от длины радиус-вектора.

В соответствии с разработанным методом и показателями точности, представленными математическими зависимостями (1)...(10), получены численные значения показателей в виде графиков. На рисунке 4 представлен график отклонения углового шага точек профиля многопериодной дорожки  $\Delta\varphi_{\text{проф}}$ , рассчитанного по формулам (1)...(7). На рисунке 5 показан график значений накопленной погрешности углового шага точек профиля многопериодной дорожки  $\Delta\varphi_{\text{проф}}^{\text{нак}}$ , рассчитанных по формулам (1)...(8). Кинематическая погрешность многопериодной дорожки (МД) представлена как разность действительных и номинальных переменных угловых положений точек профиля многопериодной дорожки относительно ее оси симметрии или вращения и определяется по формуле (10) с учетом формул (1)...(9).



**Рисунок 4 – График отклонения углового шага точек профиля многопериодной дорожки  $\Delta\varphi_{\text{проф}}$**



**Рисунок 5 – Накопленная погрешность углового шага точек профиля многопериодной дорожки  $\Delta\varphi_{\text{проф}}^{\text{нак}}$**

На графиках рисунки 4 и 5 параметр  $n$  означает количество измеренных точек профиля дорожки в пределах угла  $2\pi$ . Графики получены с большой дискретностью измерений 3272 точки.

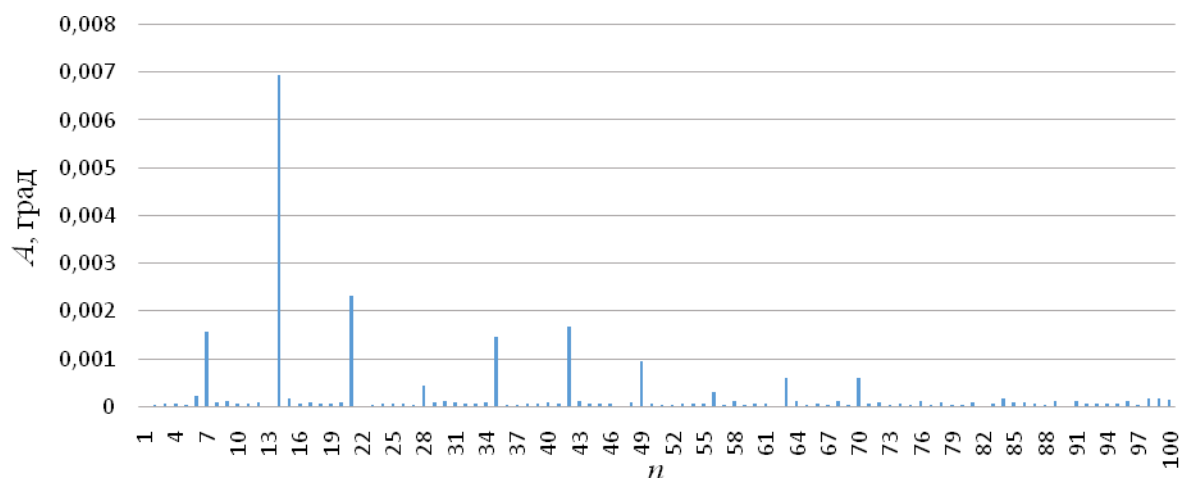
На графиках (рисунки 4 и 5) видны наибольшие и местные погрешности для разных точек поверхности дорожки, также выделяется многопериодная синусоидальная кривая с числом периодов равным числу полупериодов профиля дорожки кольца  $2z_2 = 14$ . Наибольшее значение действительного углового шага точек профиля многопериодной дорожки  $\Delta\varphi_{\text{д}}$  составило 0,163 градуса; наибольшее значение отклонения углового шага точек профиля многопериодной дорожки  $\Delta\varphi_{\text{проф}}$  (рисунок 4) составило 0,166 градуса; наибольшее значение накопленной погрешности углового шага точек профиля многопериодной дорожки  $\Delta\varphi_{\text{проф}}^{\text{нак}}$  (рисунок 5) составило 0,775 градуса, что составляет 68 % от кинематической погрешности редуктора с передаточным отношением  $i = 64$ .

На графиках (рисунки 4 и 5) значения показателей точности представлены для всего профиля дорожки. При работе передачи спутники передают нагрузку только на рабочих участках профиля с углами подъема, соответствующими радиус-векторам близким к среднему радиусу  $R$  периодической кривой, поэтому действительные величины этих показателей, которые влияют на кинематическую точность передачи, будут меньше, чем полученные на графиках.

Гармонический анализ значений показателей точности многопериодных дорожек, представленных на графиках (рисунки 4 и 5), позволяет установить частоту их изменения и влияние их на кинематическую погрешность передачи (редуктора).

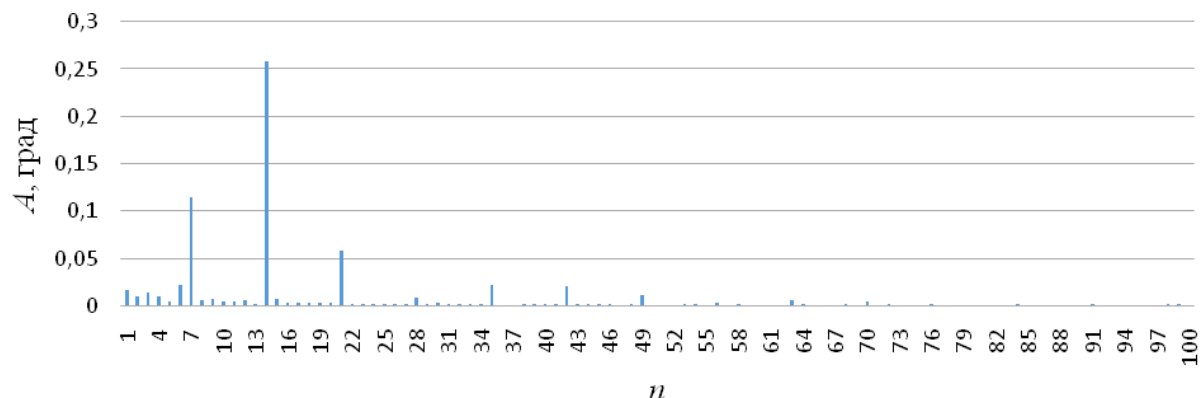
На рисунке бпредставлен амплитудно-частотный спектр отклонения углового шага точек профиля многопериодной дорожки, график которого показан на рисунке 4.





**Рисунок 6 – Амплитудно-частотный спектр отклонения углового шага точек профиля многопериодной дорожки**

На рисунке 7 представлен амплитудно-частотный спектр накопленной погрешности углового шага точек профиля многопериодной дорожки, график которого показан на рисунке 5.



**Рисунок 7 – Амплитудно-частотный спектр накопленной погрешности углового шага точек профиля многопериодной дорожки**

Амплитудно-частотные спектры (рисунки 6 и 7) включают 100 гармоник с номерами  $n$  и значениями амплитуд  $A$  в градусах. На спектрах наибольшие амплитуды  $A$  имеют гармоники с номерами  $n$  кратными числу периодов дорожки  $z_2 = 7$ . Наибольшие значения имеют гармоники 7, 14, 21, 35, 42. Циклическую частоту этих гармоник с номерами больше единицы можно записать в виде  $z$ ,  $2z$ ,  $3z$ ,  $5z$ ,  $6z$ . Период их изменения, соответственно,  $z^{-1}$ ,  $\frac{1}{2}z^{-1}$ ,  $\frac{1}{3}z^{-1}$ ,  $\frac{1}{5}z^{-1}$ ,  $\frac{1}{6}z^{-1}$ .

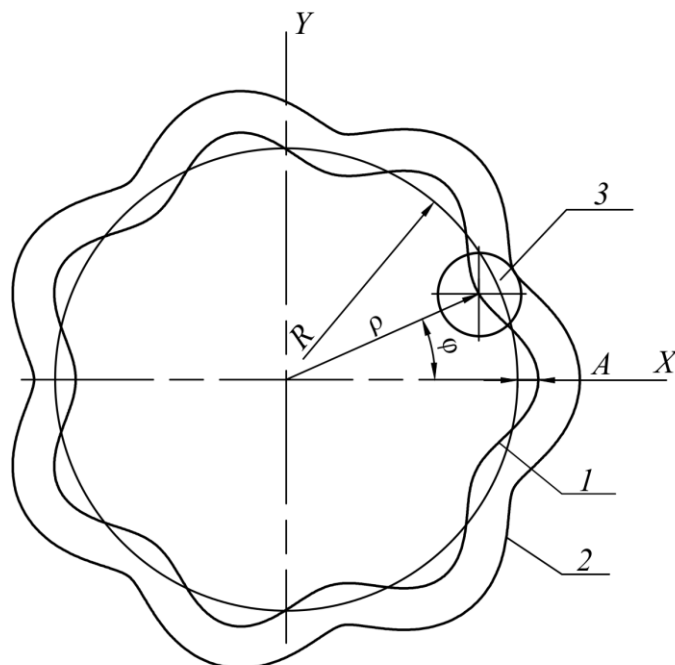
Данный метод предполагает совмещение (привязку) координат действительных и номинальных точек при расчете угловых параметров, поэтому этот метод мало учитывает возможное радиальное смещение детали с многопериодной дорожкой, которое в данном случае проявляется в малом значении амплитуды первой гармоники на амплитудно-частотных спектрах (рисунки 6 и 7).

**Разработка метода и показателей для оценки точности линейного отклонения координат точек профиля многопериодных дорожек после изготовления.**

Разработан метод и показатели для оценки точности линейного отклонения координат точек профиля многопериодных дорожек после их изготовления.

Метод заключается в совмещении действительного профиля дорожки с номинальным и нахождении линейных отклонений действительных координат точек от их номинального положения.

На рисунке 8 представлена схема геометрических параметров профиля многопериодной дорожки 2 кольца, представленного на рисунке 3, и перемещающегося по оси дорожки 1 сателлита-шарика 3.

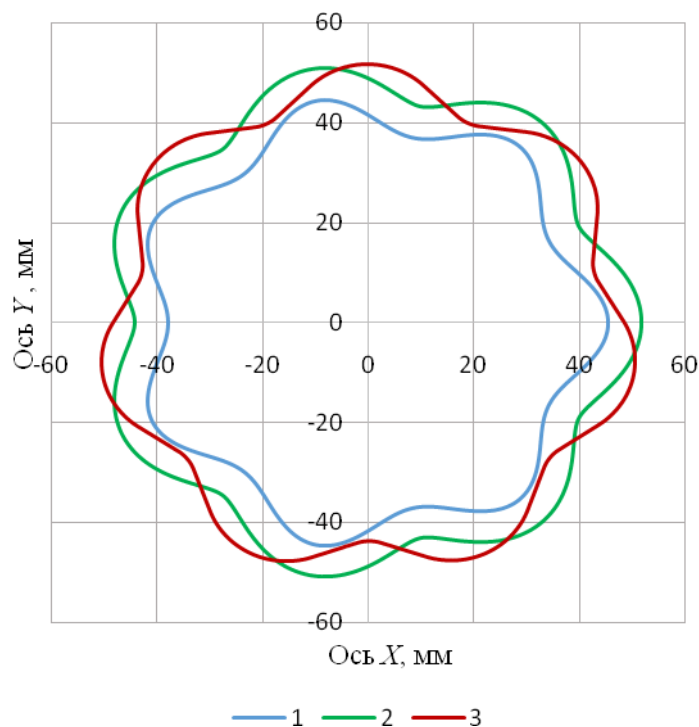


**Рисунок 8 – Схема геометрических параметров многопериодной дорожки**

В результате экспериментальных исследований криволинейной поверхности многопериодной дорожки на КИМ получен массив координат точек  $X_{\text{экс}}$ ,  $Y_{\text{экс}}$ , измеренных в плоскости торцового сечения детали с многопериодной дорожкой, т. е. получен действительный профиль многопериодной дорожки в виде экспериментальной кривой, изготовленной с упрощенной геометрией профиля в виде прямых линий и окружностей, как указано выше. Действительный профиль кривой нужно совместить с номинальным. При этом номинальная криволинейная осевая линия 1 многопериодной дорожки (рисунки 3 и 8), эквидистантная кривой профиля беговой дорожки 2, может быть описана уравнениями синусоиды, циклоиды, смещенной окружности и другими кривыми, замкнутыми на плоскости. Наиболее технологичной при проектировании является конструкция осевой линии многопериодной дорожки, описываемая периодической кривой в виде окружности со смещением оси. Эта кривая принята в качестве номинальной.

Номинальная осевая кривая 1 совпадает с осью фрезы при формообразовании многопериодной дорожки. Эта кривая эквидистантна реальной кривой после изготовления, описывающей профиль криволинейной поверхности детали, и отстает от нее на величину равную радиусу фрезы.

На рисунке 9 графически показана номинальная осевая кривая 1, построенная эквидистанта этой кривой 2 и экспериментальная кривая 3, характеризующая действительный профиль многопериодной дорожки. Кривые 2 и 3 имеют разные начальные фазы, они не совмещены.



**Рисунок 9 – Номинальная и действительная кривые профиля многопериодной дорожки**

Так как начальные фазы действительной экспериментальной и номинальной осевой (расчетной) кривых могут не совпадать, то номинальную кривую нужно совместить с действительной кривой поворотом вокруг оси. Новые координаты кривой при повороте

$$X_1 = x \cos \gamma - y \sin \gamma ; \quad (11)$$

$$Y_1 = x \sin \gamma + y \cos \gamma , \quad (12)$$

где  $\gamma$  – угол поворота кривой.

После совмещения кривых найдем отклонение действительного профиля дорожки от номинального  $\Delta h$  соотношением координат расчетной и экспериментальной кривых

$$\Delta h = \sqrt{(X_{\text{экс}} - X_{\text{экс}}^{\text{ном}})^2 + (Y_{\text{экс}} - Y_{\text{экс}}^{\text{ном}})^2} . \quad (13)$$

Так как получено большое число измеренных точек (3272 точки), соответственно, рассчитано большое число отклонений  $\Delta h_i$  многопериодной дорожки и могут быть случайные точки, то  $\Delta h$  принималось как среднее арифметическое значение отклонений  $\Delta h_i$  профиля многопериодной дорожки по формуле

$$\Delta h_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta h_i}{n} . \quad (14)$$

Данный метод, в отличие от метода оценки точности углового положения координат точек профиля многопериодных дорожек, позволяет оценивать радиальные погрешности заготовки при ее обработке. Смещение оси детали с многопериодной дорожкой определялось по формуле

$$\Delta_o = \frac{\rho_{\text{экс}}^{\text{ср}} - R - r + h_{\text{щ}}}{2}, \quad (15)$$

где  $\rho_{\text{экс}}^{\text{ср}}$  – среднее значение радиус-векторов измеренных точек профиля многопериодной дорожки;  $R$  – средний радиус многопериодной дорожки;  $r$  – радиус сателлита;  $h_{\text{щ}}$  – толщина щупа, при измерении на КИМ.

При работе передачи сателлиты передают наибольшую нагрузку на ограниченном участке контакта со средней частью полупериода беговой дорожки. Поэтому полупериод беговой дорожки был разделен условно на пять частей и на средней пятой части каждого полупериода был рассчитан параметр  $\Delta h$ , который принят как среднее значение отклонений профилей полупериодов многопериодной дорожки  $\Delta h_{\text{ср}}^{\text{мн}}$ . Показатель  $\Delta h_{\text{ср}}^{\text{мн}}$  составил 0,163 мм. На основе разработанного метода предложены показатели точности линейного отклонения координат точек профиля многопериодных дорожек, представленные выше.

### **Заключение**

Разработаны методы оценки точности изготовления профиля многопериодной дорожки с использованием технологии координатных измерений на координатно-измерительной машине. Разработаны компьютерные программы для обработки экспериментальных результатов измерений и расчета погрешностей, определяющих точность профиля многопериодной дорожки. Для оценки влияния точности изготовления профиля беговых дорожек на кинематическую погрешность планетарных механизмов с телами качения использовался гармонический анализ с построением амплитудно-частотных спектров кинематических погрешностей установленных показателей.

Разработана методика сканирования криволинейных поверхностей детали с некоторым заданным линейным шагом точек кривой. Координаты точек, выведенные в ASCII-файл, использованы для построения реального профиля кривой с целью дальнейшего наложения на график идеального профиля кривой и определения погрешностей изготовления, как наибольшей разности между реальным и номинальным профилями.

Разработаны методы для контроля и оценки точности многопериодных дорожек с установлением показателей точности, характеризующие угловые и линейные положения координат точек после изготовления многопериодных дорожек. В соответствии с разработанными методами и показателями точности, представленными математическими зависимостями, получены численные значения показателей в виде графиков.

### **Список цитированных источников**

1. Планетарные кулачково-плунжерные передачи. Проектирование, контроль и диагностика : монография / М. Ф. Пашкевич, В. М. Пашкевич, А. М. Пашкевич, С. В. Чертков. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2003. – 221 с.

2. Лустенков, М. Е. Передачи с промежуточными телами качения: определение и минимизация потерь мощности : монография / М. Е. Лустенков. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2010. – 274 с.
3. Капитонов, А. В. Кинематические и массогабаритные характеристики ресурсоэффективных механических передач. Компьютерное моделирование, экспериментальная оценка : монография / А. В. Капитонов, В. М. Пашкевич. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2017. – 248 с.
4. Автоматизированное проектирование конструкций малогабаритных радиально-плунжерных редукторов с использованием современных САПР / А. В. Капитонов, К. В. Сасковец, А. И. Касьянов [и др.] // Вестн. Бел.-Рос. ун-та. – 2015, № 3 (48). – С. 25–32.
5. Тайц, Б. А. Точность и контроль зубчатых колес / Б. А. Тайц, – М. : Машиностроение, 1972. – 368 с.
6. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач : учебное пособие / В. Е. Антонюк, М. М. Кане, С. В. Старжинский [и др.]. – Минск : Технопринт, 2003. – 766 с.
7. Повышение точности механических передач на основе компьютерного моделирования и использования технологий искусственного интеллекта : монография / В. М. Пашкевич [и др.]. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2011. – 139 с.
8. Jiang, N. Transmission Efficiency of Cycloid–Pinion System Considering the Assembly Dimensional Chain / N. Jiang, S. Wang, A. Yang [et al.] // Applied Sciences. – 2022. – Vol, 12. – 21 p.
9. Pabiszczak, S. Effect of Manufacturing Errors on the Operation of the Eccentric Rolling Transmission / S. Pabiszczak, W. Ptaszynski // Advances in Science and Technology – Research Journal. – 2020. – Vol. 14 (3). – P. 213–222.
10. Lustenkova, E. S. Experimental estimation of efficiency and kinematic accuracy of a spherical roller transmission / E. S. Lustenkova : IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Conference on Mechanical Engineering and Modern Technologies (MEMT 2020), Tomsk, Russia, 26–30 October 2020. – Vol. 1118. – 6 p.
11. Громыко, П. Н. Использование удлиненной эпициклоиды для формообразования зубчатых поверхностей передач эксцентрикового типа / П. Н. Громыко, С. Н. Хатетовский, В. Л. Юркова // Вестн. Бел.-Рос. ун-та. – 2019, № 1 (62). – С. 14–21.
12. Kapitonov, Alexandr V. Optimization of geometrical parameters and estimation of kinematic accuracy of resource effective planetary transmission. Advances in Engineering Research / Alexandr V. Kapitonov : International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018). – 2018. – Vol. 158. – P. 165–168.
13. Капитонов, А. В. Исследование кинематической погрешности планетарного эксцентрикового редуктора / А. В. Капитонов, Д. В. Непша, М. В. Гончаров [и др.] // Вестн. Бел.-Рос. ун-та. – 2014. – № 3 (44). – С. 14–24.
14. Капитонов, А. В. Исследование кинематической точности планетарных роликовых передач методами гармонического анализа и контроля в сборе / А. В. Капитонов, С. Г. Черняков // Вестн. Бел.-Рос. ун-та. – 2011. – № 4 (33). – С. 40–50.
15. Капитонов, А. В. Методы экспериментальных исследований кинематической точности планетарных передач с промежуточными телами качения и контроля профиля беговых дорожек / А. В. Капитонов, С. Г. Черняков, К. В. Сасковец, А. И. Касьянов // Вестн. Бел.-Рос. ун-та. – 2016. – № 2 (51). – С. 41–50.
16. Пашкевич, В. М. Математическое обеспечение геометрического контроля сложных периодических профилей с использованием КИМ Dura Max фирмы «Карл Цейс» (Carl Zeiss) / В. М. Пашкевич // Вестн. Бел.-Рос. ун-та. – Могилев, 2014. – № 4. – С. 42–48.
17. Капитонов, А. В. Точность и контроль малогабаритных планетарных механизмов: монография / А. В. Капитонов. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т. – 2021 – 160 с.
18. Капитонов, А. В. Разработка показателей для контроля точности изготовления многопериодных дорожек планетарных передач с телами качения / А. В. Капитонов // Актуальные вопросы машиноведения: сборник научных трудов. – Вып. 10 / Объединенный институт машиностроения Нац. академии наук Беларуси. – Минск, 2021. – С. 7–12.
19. Патент 3258 U Республика Беларусь, МПК В 66В 5/02. Шариковое редукторное устройство для ручного перемещения кабины лифта / Рудник П. М., Тюков А. В., Балабанов

И. Н., Грибов С. С., Миронов С. В., Пашкевич М. Ф., Пашкевич В. М., Пашкевич А. М. ; заявитель Респ. унитарн. предпр-е завод «Могилевлифтмаш». – № и 20060362; заявл. 2006.06.05; опубл. 2006.12.30.

20. Игнатищев, Р. М. Синусошариковые редукторы / Р. М. Игнатищев. – Минск : Выш. школа, 1983. – 107 с.

## References

1. Planetarnye kulachkovo-plunzhernye peredachi. Proektirovanie, kontrol' i diagnostika: monografija / M. F. Pashkevich, V. M. Pashkevich, A. M. Pashkevich, S. V. Chertkov. – Mogilev : Bel.-Ros. un-t, 2003. – 221 s.

2. Lustenkov, M. E. Peredachi s promezhutochnymi telami kachenija: opredelenie i minimizacija poter' moshhnosti: monografija / M. E. Lustenkov. – Mogilev: Bel.-Ros un-t, 2010. – 274 s.

3. Kapitonov, A. V. Kinematicheskie i massogabaritnye harakteristiki resursojeffektivnyh mehanicheskikh peredach, Komp'juternoe modelirovanie, jeksperimental'naja ocenka: monografija / A. V. Kapitonov, V. M. Pashkevich, – Mogilev: Bel.-Ros. un-t, 2017. – 248 s.

4. Avtomatizirovannoe proektirovanie konstrukcij malogabaritnyh radial'no-plunzhernyh reduktorov s ispol'zovaniem sovremennyh SAPR / A. V. Kapitonov, K. V. Saskovec, A. I. Kas'janov [i dr.] // Vestn. Bel.-Ros. un-ta. – 2015. – № 3 (48). – S. 25–32.

5. Tajc, B. A. Tochnost' i kontrol' zubchatyh koles / B. A. Tajc. – M. : Mashinostroe-nie, 1972. – 368 s.

6. Tehnologija proizvodstva i metody obespechenija kachestva zubchatyh koles i peredach: Uchebnoe posobie / V. E. Antonjuk, M. M. Kane, Starzhinskij [i dr.], – Mn.: UP «Tehno-print», 2003, – 766 s,

7. Povyshenie tochnosti mehanicheskikh peredach na osnove komp'juternogo modelirova-nija i ispol'zovanija tehnologij iskusstvennogo intellekta: monografija / V. M. Pashkevich [i dr.]. – Mogilev : Bel.-Ros. un-t, 2011. – 139 s.

8. Jiang, N. Transmission Efficiency of Cycloid–Pinion System Considering the Assembly Dimensional Chain / N. Jiang, S. Wang, A. Yang, W. Zhou, J. Zhang // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – 21 p.

9. Pabiszczak, S. Effect of Manufacturing Errors on the Operation of the Eccentric Rolling Transmission / S. Pabiszczak, W. Ptaszynski // Advances in Science and Technology – Research Journal. – 2020. – Vol. 14 (3). – P. 213–222.

10. Lustenkova, E. S. Experimental estimation of efficiency and kinematic accuracy of a spherical roller transmission / E. S. Lustenkova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Conference on Mechanical Engineering and Modern Technologies (MEMT 2020). Tomsk, Russia, 26–30 October 2020. – Vol. 1118. – 6 p.

11. Gromyko, P. N. Ispol'zovanie udlinennoj jepicikloidy dlja formoobrazovanija zubchatyh poverhnostej peredach jekscentrikovogo tipa / P. N. Gromyko, S. N. Hatetovskij, V. L. Jurkova // Vestn. Bel.-Ros. un-ta. – 2019, № 1 (62). – S. 14–21.

12. Alexandr V. Kapitonov, Optimization of geometrical parameters and estimation of kinematic accuracy of resource effective planetary transmission, Advances in Engineering Research, International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018). – 2018. – vol, 158. – P. 165–168.

13. Kapitonov, A. V. Issledovanie kinematicheskoy pogreshnosti planetarnogo jekscentrikovogo reduktora / A. V. Kapitonov, D. V. Nepsha, M. V. Goncharov, V. P. Lysov, S. G. Chernjakov // Vestn. Bel.-Ros. un-ta. – 2014. – № 3 (44). – S. 14–24.

14. Kapitonov A. V. Issledovanie kinematicheskoy tochnosti planetarnyh rolikovyh peredach metodami garmonicheskogo analiza i kontrolja v sbore / A, V, Kapitonov, S, G, Chernjakov // Vestn, Belarus,-Ros, un-ta, – 2011, – № 4 (33), – S, 40–50, – DOI: 10,53078/20778481\_2011\_4\_40,

15. Kapitonov, A, V, Metody jeksperimental'nyh issledovanij kinematicheskoy tochnosti planetarnyh peredach s promezhutochnymi telami kachenija i kontrolja profilja be-govyh dorozhek / A, V, Kapitonov, S, G, Chernjakov, K, V, Saskovec, A, I, Kas'janov // Vestn, Belarus,-Ros, un-ta, – 2016, – № 2 (51), S, 41–50, – DOI: 10,53078/20778481\_2016\_2\_41,

16. Pashkevich, V, M, Matematicheskoe obespechenie geometricheskogo kontrolja slozhnyh periodicheskikh profilej s ispol'zovaniem KIM Dura Max firmy «Karl Cejs» (Carl Zeiss) / V, M, Pashkevich // Vest, Mogilev, Bel, Ros, un-ta, – Mogilev, 2014, – № 4, – S, 42–48, – DOI: 10,53078/20778481\_2014\_4\_42,

17. Kapitonov A, V, Tochnost' i kontrol' malogabaritnyh planetarnyh mehanizmov: monografija / A, V, Kapitonov, – Mogilev: Belorus,-Ros, un-t, 2021, – 160 s,

18. Kapitonov A, V, Razrabotka pokazatelej dlja kontrolja tochnosti izgotovlenija mnogoperiodnyh dorozhek planetarnyh peredach s telami kachenija / A, V, Kapitonov // Aktual'nye voprosy mashinovedenija: sbornik nauchnyh trudov, Vyp, 10 / Ob#edinennyj institut mashinostroenija Nacional'noj akademii nauk Belarusi, – Minsk, 2021, – S, 7–12,

19. Pat, 3258 U Respublika Belarus', MPK B 66B 5/02, Sharikovoe reduktornoe ustrojstvo dlja ruchnogo peremeshhenija kabiny lifta / Rudnik P, M., Tjukov A, V., Balaba-nov I, N., Gribov S, S., Mironov S, V., Pashkevich M, F.,; Pashkevich V, M., Pashkevich A, M.,; zajavitel' Respublikanskoe unitarnoe predpriyatje zavod «Mogilevliftmash», – № u 20060362; zajavl, 2006,06,05; opubl, 2006,12,30,

20. Ignatishhev, R, M, Sinusosharikovye reduktory / R, M, Ignatishhev, – Minsk: Vysh, shkola, 1983, – 107 s,

УДК 621.436.068.4

## ПОЯВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФАЗАМИ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

*А. М. Левданский, магистр технических наук, старший преподаватель кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: amlaudanski@mail.ru*

*Я. В. Кудрицкий, старший преподаватель кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: yaroslav,kudriczkij@mail.ru*

*Н. С. Ялковский, старший преподаватель кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей, Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ira\_yalk@mail.ru*

### Реферат

Изменение длины фаз впуска и выпуска позволяет менять характеристики двигателя, что широко применяется в автоспорте. Крупный японский автопроизводитель фирмы Honda для достижения наилучших характеристик двигателя в любых условиях работы, разработал и использует систему VTEC, автоматически изменяющую фазы газораспределения.

В данной статье рассмотрены основные варианты системы VTEC.

**Ключевые слова:** изменение фаз газораспределения, электронная система управления, двигатели внутреннего сгорания фирмы Honda.

## APPEARANCE AND DEVELOPMENT OF THE ELECTRONIC SYSTEM VALVE PHASE CONTROL

**A. M. Levdansky, Y. V. Kudritsky, N. S. Yalkovsky**

### Abstract

Changing the length of the intake and exhaust phases allows you to change the characteristics of the engine, which is widely used in motorsport. The large Japanese