

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАЛОГАБАРИТНЫХ ПЛАНЕТАРНЫХ ПЕРЕДАЧ

Капитонов А.В.

Белорусско-Российский университет, г. Могилев

Ключевые слова: криволинейная поверхность, многопериодная дорожка, точность изготовления, отклонение профиля.

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы точности изготовления криволинейных поверхностей многопериодных дорожек деталей малогабаритных планетарных передач с телами качения. Разработана методика оценки точности проектирования и изготовления профиля многопериодной дорожки. Приведены математические зависимости, позволяющие рассчитать номинальный профиль криволинейной поверхности дорожки и найти его отклонение от действительного профиля. Разработана компьютерная программа, позволяющая автоматизировать математические расчеты. Проведен гармонический анализ погрешности профиля дорожки. Установлены наиболее значимые гармоники амплитудно-частотного спектра.

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE ACCURACY OF MANUFACTURING CURVED SURFACES OF SMALL-SIZED PLANETARY GEAR PARTS

Kapitonov A.V.

Belarusian-Russian University, Mogilev

Keywords: curved surface, multi-period track, manufacturing accuracy, profile deviation.

Abstract. The article deals with the accuracy of manufacturing curved surfaces of multi-period tracks of parts of small-sized planetary gears with rolling bodies. A methodology for evaluating the accuracy of designing and manufacturing a multi-period track profile has been developed. Mathematical dependences are given that allow calculating the nominal profile of the curved surface of the track and finding its deviation from the actual profile. A computer program has been developed to automate mathematical calculations. A harmonic analysis of the track profile error was carried out. The most significant harmonics of the amplitude-frequency spectrum are established.

Точность изготовления криволинейных поверхностей многопериодных дорожек планетарных малогабаритных передач с промежуточными телами качения в значительной степени влияет на ряд их эксплуатационных характеристик таких, как кинематическая точность, плавность работы, нагрузочная способность. Планетарные передачи [1] имеют в зацеплении сателлиты в виде шариков или роликов, которые перемещаются в контакте с криволинейной поверхностью неподвижной многопериодной дорожки, а также с поверхностью ведущего звена и передают вращение на водило и ведомый вал. Передачи имеют небольшие габариты и массу, удобную компоновку для встраивания в механизмы автоматизированного производства. Они достаточно технологичны при изготовлении. Наиболее ответственной поверхностью при эксплуатации и изготовлении является многопериодная дорожка.

Детали с многопериодными дорожками в виде колец изготавливаются из легированных сталей. На станках с ЧПУ многопериодные дорожки обрабатываются двукратным фрезерованием, подвергаются термической обработке, при необходимости выполняются отделочные операции их поверхностей. Контроль криволинейных поверхностей колец выполняется на координатно-измерительных машинах в автоматическом цикле.

Криволинейная осевая линия многопериодной дорожки может быть описана уравнениями синусоиды, циклоиды, смещенной окружности и другими кривыми, замкнутыми на плоскости. Радиус-вектор точки кривой в полярных координатах в общем виде определяется по формуле

$$\rho = f(\varphi), \quad (1)$$

где φ – полярный угол.

В прямоугольных координатах параметрические уравнения данной кривой имеют вид:

$$X = \rho \cos(\varphi); \quad Y = \rho \sin(\varphi). \quad (2)$$

Наиболее простой при проектировании является конструкция передачи с многопериодной дорожкой, описываемой окружностью со смещением оси. Полярное уравнение такой окружности можно определить по формуле [2]

$$\rho = \sqrt{R^2 - A^2 \sin^2(z\varphi) + A \cos(z\varphi)}, \quad (3)$$

где ρ – радиус-вектор точки кривой; R – радиус окружности; A – величина смещения окружности, амплитуда многопериодной кривой; z – число периодов кривой; φ – полярный угол.

В формуле (3) при $z = 1$ кривая имеет форму окружности со смещением центра на величину A , а при $z > 1$ – форму многопериодной кривой, замкнутой на плоскости.

На рисунке 1, а показана фотография детали с многопериодной дорожкой на внутренней криволинейной поверхности, а на рисунке 1, б – схема геометрических параметров дорожки в соответствии с формулой (3).

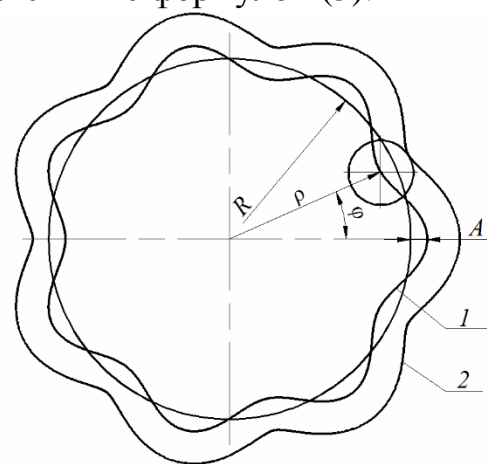


Рис. 1. Деталь с многопериодной дорожкой: а – фотография; б – схема геометрических параметров дорожки

Расчетные координаты точек кривой

$$X = \left(\sqrt{R^2 - A^2 \sin^2(z\varphi) + A \cos(z\varphi)} \right) \cos \varphi, \quad (4)$$

$$Y = \left(\sqrt{R^2 - A^2 \sin^2(z\phi)} + A \cos(z\phi) \right) \sin \phi. \quad (5)$$

На рисунке 1,а показана деталь с наиболее технологичной формой профиля многопериодной дорожки. При этом профиль криволинейной поверхности представляет собой сочетание окружностей радиусом 17мм и прямых с углом наклона 46 градусов, равным наибольшему углу подъема номинальной кривой. Профиль является менее затратным при проектировании и изготовлении. Ставилась задача определить точность изготовления дорожки с данной геометрией и на основе полученных результатов сделать анализ погрешностей обработки.

Для контроля криволинейной поверхности после изготовления использовалась координатно-измерительная машина Carl Zeiss DuraMax 5/5/5 с программным обеспечением Calypso. В результате контроля получен массив координат точек $X_{экс}$, $Y_{экс}$, измеренных в плоскости торцового сечения детали с многопериодной дорожкой. После контроля расчетную (номинальную) кривую нужно совместить с экспериментальной кривой поворотом вокруг оси. Новые координаты кривой при повороте

$$X_1 = x \cos \gamma - y \sin \gamma, \quad (6)$$

$$Y_1 = x \sin \gamma + y \cos \gamma, \quad (7)$$

где γ – угол поворота кривой.

Расчетная кривая 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. Найдем координаты точек эквидистантной номинальной кривой в соответствии с [3]. На рисунке 2 показана схема для расчета координат точек эквидистантной кривой многопериодной дорожки.

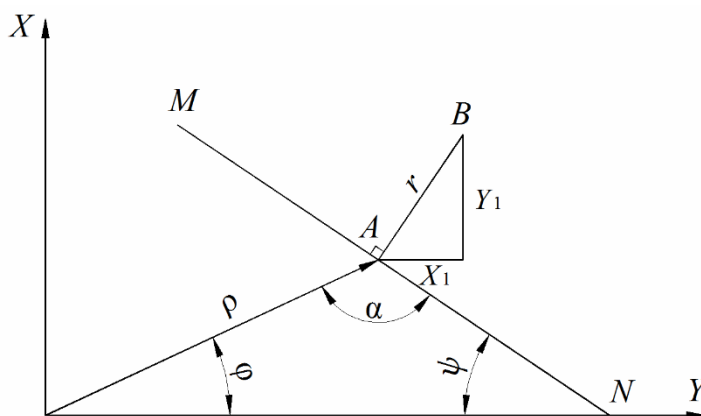


Рис. 2. Схема расчета координат точек эквидистантной кривой многопериодной дорожки

Номинальные координаты точек эквидистантной кривой многопериодной дорожки

$$X_{экс}^{НОМ} = x_1 + r \sin \psi, \quad (8)$$

$$Y_{экс}^{НОМ} = y_1 + r \cos \psi, \quad (9)$$

$$\psi = 2\pi - \phi - \alpha, \quad (10)$$

где r – радиус фрезы, проведенный из точки A расчетной кривой к точке B эквидистантной кривой; ψ – угол наклона касательной MN к точке A расчетной кривой; α – угол между направлением радиус вектора ρ и касательной MN .

Угол α найдем из соотношений [3]

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{\rho'}{\rho} = \frac{d\rho}{d\varphi} \cdot \frac{1}{\rho}, \quad (11)$$

$$\alpha = \operatorname{arccctg} \frac{\rho'}{\rho}. \quad (12)$$

Для кривой – смещенной окружности

$$\frac{d\rho}{d\varphi} = -Az \sin(z\varphi) \left(\frac{A \cos(z\varphi)}{\sqrt{R^2 - A^2 \sin^2(z\varphi)}} + 1 \right). \quad (13)$$

Найдем отклонение действительного профиля дорожки от номинального Δh соотношением координат расчетной и экспериментальной кривых

$$\Delta h = \sqrt{(X_{\text{экс}} - X_{\text{экс}}^{\text{НОМ}})^2 + (Y_{\text{экс}} - Y_{\text{экс}}^{\text{НОМ}})^2}. \quad (14)$$

Разработана компьютерная программа в среде VBA для расчета погрешности профиля дорожки в соответствии с зависимостями (1)-(14).

На рисунке 3 показан график отклонения действительного профиля многопериодной дорожки от номинального.

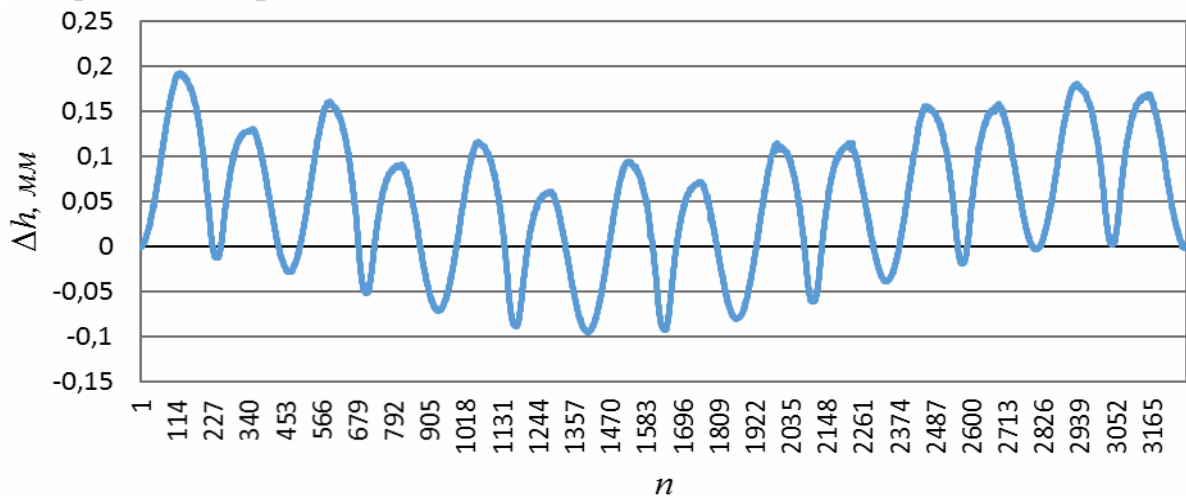


Рис. 3. График отклонения действительного профиля многопериодной дорожки от номинального

На графике n – число измерений. Из графика (рис. 4) видно наибольшее значение погрешности профиля дорожки, которое составляет 0,288 мм, а также 14 периодов местных погрешностей, равных $2z$.

Используя ряд Фурье [4] проведен гармонический анализ функции погрешности профиля дорожки, представленной на рисунке 4, по формулам

$$F(\varphi) = a_0 / 2 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\varphi + b_k \sin k\varphi), \quad (15)$$

$$c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad (16)$$

где $F(\varphi)$ – функция изменения угловых значений параметра; $a_0/2$ – нулевой член разложения; a_k, b_k, c_k – коэффициенты ряда Фурье; k -порядковый номер гармонической составляющей.

Коэффициент c_k является амплитудой гармонической составляющей функции и характеризует наиболее значимые гармоники амплитудно-частотного спектра. Наибольшие амплитуды c_k имеют гармоники с номерами 1 и кратными z – числу периодов дорожки, $z = 7$. Гармоника с номером 1 характеризует радиальное смещение профиля дорожки и зависит от точности установки заготовки в приспособлении при обработке на станке. Гармоники с номерами 7, 14, 21, 28 и 35 характеризуют тангенциальные погрешности профиля дорожки и зависят от точности обрабатываемого станка и инструмента.

Точность криволинейной поверхности многопериодной дорожки с принятой упрощенной геометрией ее профиля и указанной технологией изготовления соответствует 11 и 12 квалитетам.

Повысить геометрическую точность детали с многопериодной дорожкой можно настройкой станка при обработке, значительно уменьшив радиальное смещение криволинейной поверхности и, соответственно, первую гармонику в спектре погрешностей профиля. Однако эта погрешность незначительна и не превышает 0,1мм. Шлифование криволинейной поверхности дорожки не приведет к существенному повышению ее геометрической точности, так как дорожка спроектирована с отклонением от номинальной геометрии. Поэтому для передач данного типа, к которым предъявляются требования высокой кинематической точности, необходимо проектировать профиль дорожки в соответствии с теоретическими кривыми и математическими зависимостями, представленными в разработанной методике расчета.

Список литературы

1. Капитонов А.В. Компьютерное 3D-моделирование конструкций и кинематических параметров планетарных малогабаритных передач / А.В. Капитонов, К.В. Сасковец, А.И. Касьянов // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. – 2016. – № 11. – С. 34-40.
2. Сасковец К.В. Новые конструкции и методы оценки точности планетарных радиально-плунжерных передач / К.В. Сасковец, А.В. Капитонов, М.В. Лебедев // Вестн. Гомельского гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого. – 2019. – № 1 (76). – С. 3-9.
3. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов, т. 1: Учебное пособие для втузов. – 13-е изд. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 432 с.
4. Справочник технолога машиностроителя. Т. 1 / Под ред. Косиловой А.Г. и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., пер. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 656 с.

Сведения об авторе:

Капитонов Александр Валентинович – к.т.н., доцент.