

Р. М. Грубка, д-р техн. наук, доцент
Донецкий национальный технический университет, ДНР
Тел./Факс: +38 (071) 3114221; E-mail: grubka_roman@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДА МЕЖДУ СИСТЕМАМИ КООРДИНАТ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ ПРИ МНОГОКООРДИНАТНОЙ ОБРАБОТКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС

В статье представлены основные зависимости по определению параметров перехода между системами координат режущего инструмента и шестерни с пространственно-модифицированными зубьями при многокоординатной обработке цилиндрических колес. Зависимости позволяют определить положение и параметры профилирующей плоскости в пространстве в зависимости от вида и параметров траектории перемещения режущего инструмента. Использование результатов работы в рамках пространственного подхода к решению вопросов формообразования зубчатых венцов с пространственно-модифицированными зубьями на зубофрезерных операциях позволяет теоретически исследовать процессы нарезания зубчатых венцов с целью повышения геометрической точности зубьев, назначения наиболее рациональных режимных параметров обработки для непрерывно изменяющихся условий резания или определения резервов в повышении производительности процесса нарезания модифицированных зубчатых венцов цилиндрических колес.

Ключевые слова: цилиндрическая зубчатая передача, зубчатый венец, боковая поверхность зубьев, модификация зубьев, траектория перемещения, режущий инструмент, профилирующая плоскость.

R. M. Grubka

DETERMINATION OF TRANSITION PARAMETERS BETWEEN THE CUTTING TOOL AND WORKPIECE COORDINATE SYSTEMS WITH MULTI-COORDINATE CYLINDRICAL WHEELS MACHINING

The article presents the main dependencies for determining the transition parameters between the coordinate systems of the cutting tool and gears with spatially modified teeth in multi-coordinate cylindrical wheels machining. Depending possible to determine the position and parameters of a profiling plane in space, depending on the type and parameters of the trajectory of the cutting tool. Using the results of the work within the spatial approach to solving the problems of shaping gear rims with spatially modified teeth in gear hobbing operations allows theoretically investigating the cutting gear rims processes in order to increase the teeth geometric accuracy, the appointment of the most rational processing parameters for continuously changing cutting conditions or determination of reserves in increasing the productivity of the modified cutting process toothings cylindrical wheels.

Keywords: spur gear, gear ring, teeth side surface, teeth modification, copying method, displacement path, cutting tool, profiling plane

1. Введение

В настоящее время сдерживающим фактором для широкого применения пространственных зацеплений цилиндрических колес является отсутствие обобщенных расчетных методик для определения элементов технологического обеспечения изготовления зубчатых венцов с пространственно-модифицированными зубьями, зацепления на основе которых способны компенсировать все погрешности изготовления и монтажа, а также перемещения, вызванные деформациями в процессе эксплуатации в результате действия рабочей нагрузки [1, 2].

Технологические способы формообразования цилиндрических колес с наружными зубьями с модифицированной боковой поверхностью приведены в работе [3]. Получение теоретически точной пространственной модификации зубьев возможно при

выполнение двух условий второго способа Оливье, что практически реализуемо на операциях финишной обработки зубчатых венцов. При этом зубчатые венцы с пространственной модификацией зубьев, приближенной к заданной пространственной [4, 5], могут применяться для менее ответственных зубчатых зацеплений или быть нарезаны при черновой обработке зубчатых венцов с припуском под последующую обработку.

В процессе формообразования зубьев нарезаемый профиль без искажения воспроизводится в профилирующей плоскости, положение которой в пространстве зависит от вида траектории относительного перемещения режущего инструмента [6, 7]. В соответствии с предложенной классификацией движений [6, 7] для повышения точности изготовления зубчатых венцов с пространственно-модифицированными зубьями методом копирования режущий инструмент должен перемещаться по пространственной криволинейной траектории рис. 1. При этом происходит непрерывное изменение положения профилирующей плоскости в пространстве и смещение нарезаемого профиля зубьев в заданном направлении [8]. В связи с тем, что с применением существующего серийного оборудования и стандартного режущего инструмента, нарезается зубчатый венец с пространственной модификацией зубьев, приближенной к рассчитанной теоретически, для более близкого приближения геометрических параметров боковой поверхности зубьев к теоретически рассчитанным, необходимо найти такое положение профилирующей плоскости, чтобы минимизировать отклонения нарезаемого профиля зуба от теоретически точного во всех сечениях по ширине зубчатого венца. Достичь требуемого результата можно при постановке и решении пространственных технологических задач формообразования зубчатых венцов с пространственной модификацией зубьев, т.е. при переходе к многокоординатной обработке зубчатых венцов. Поэтому определение положения профилирующей плоскости режущего инструмента при многокоординатной обработке пространственно-модифицированных зубчатых венцов является актуальной научной задачей.

Цель работы: определение параметров перехода между системами координат режущего инструмента и шестерни с пространственно-модифицированными зубьями и положения профилирующей плоскости режущего инструмента в пространстве при многокоординатной обработке цилиндрических колес в зависимости от вида траектории перемещения режущего инструмента.

2. Основное содержание и результаты работы

На основании выше изложенного в работе [8] предложено два способа многокоординатного зубофрезерования методом копирования: обработка пальцевой и дисковой модульными фрезами (рис. 1.).

На рис. 1а представлена схема обработки зубчатого венца пальцевой модульной фрезой. Как видно из рис. 1а, с пальцевой фрезой связана подвижная система координат $x_0y_0z_0$, начало которой расположено на кривой $a-a$, определяющей траекторию перемещения режущего инструмента. Инструмент вращается вокруг оси O_0y_0 с угловой скоростью ω_0 и перемещается вдоль пространственной траектории $a-a$. При этом непрерывно изменяется положение профилирующей плоскости $x_0O_0y_0$.

На рис. 1б представлена схема обработки зубчатого венца дисковой модульной фрезой. Как видно из рис. 1б, с дисковой модульной фрезой связана подвижная система координат $x_0y_0z_0$, начало которой расположено на пересечении плоскости симметрии фрезы и ее оси вращения. Инструмент вращается относительно оси O_0x_0 с угловой скоростью ω_0 . Для удобства осуществления расчетов выбрана промежуточная подвижная система координат $x'_0y'_0z'_0$, которая также связана с режущим инструментом. Начало

координат O_0' промежуточной системы координат $x_0' O_0' y_0'$ непрерывно изменяет свое местоположение, перемещаясь по пространственной траектории $a-a$. При этом непрерывно изменяется положение профилирующей плоскости $x_0' O_0' y_0'$.

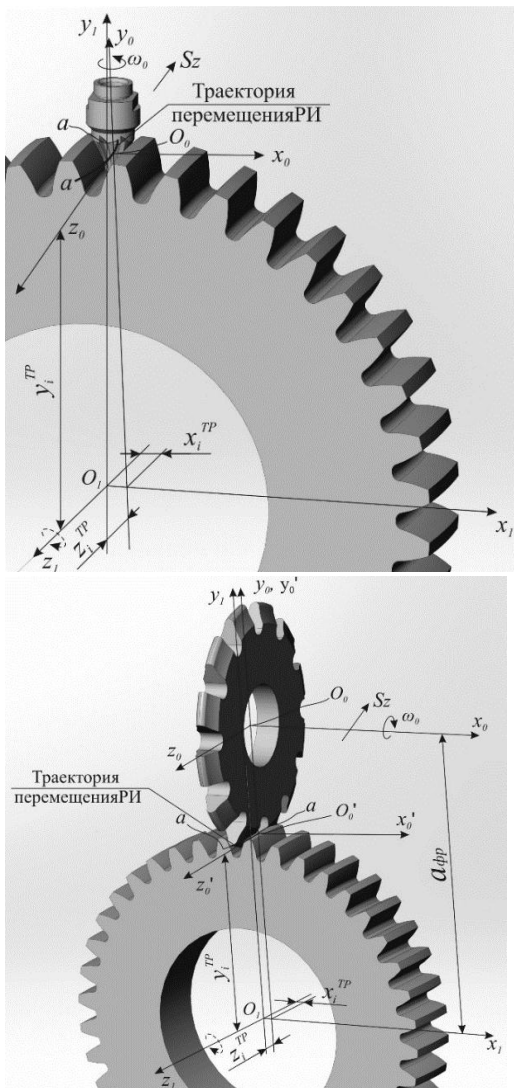


Рисунок 1. Многокоординатное зубофрезерование пространственно-модифицированных зубьев методом копирования: а - пальцевой модульной фрезой; б - дисковой модульной фрезой.

Для перехода от системы координат режущего инструмента $S_0(x_0, y_0, z_0)$ ($S_0'(x_0', y_0', z_0')$) - для дисковой модульной фрезы к системе координат шестерни $S_1(x_1, y_1, z_1)$ необходимо выполнить (промежуточные положения осей системы координат шестерни на рис. 1. не показаны):

- перенос относительно осей абсолютной системы координат в заданную точку траектории относительного перемещения режущего инструмента с координатами $x_i^{mp}, y_i^{mp}, z_i^{mp}$:

$$M_P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_i^{mp} \\ 0 & 1 & 0 & y_i^{mp} \\ 0 & 0 & 1 & z_i^{mp} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (1)$$

- поворот относительно оси x_1^1 на угол α_x :

$$M_{\alpha_x} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_x & \sin \alpha_x & 0 \\ 0 & -\sin \alpha_x & \cos \alpha_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (2)$$

- поворот относительно оси y_1^{11} на угол α_y :

$$M_{\alpha_y} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_y & 0 & \sin \alpha_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha_y & 0 & \cos \alpha_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Найдя произведение матриц M_P, M_{α_x} и M_{α_y} , получим матрицу перехода от системы координат $S_0(x_0, y_0, z_0)$ к системе координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$:

$$M_0 = M_P M_{\alpha_x} M_{\alpha_y} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_y & 0 & \sin \alpha_y & x_i^{mp} \\ -\sin \alpha_x \sin \alpha_y & \cos \alpha_x & \cos \alpha_y \sin \alpha_x & y_i^{mp} \\ -\cos \alpha_x \sin \alpha_y & -\sin \alpha_x & \cos \alpha_x \cos \alpha_y & z_i^{mp} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

Система уравнений для перехода от системы координат $S_0(x_0, y_0, z_0)$ к системе координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \cos \alpha_y x_0 + \sin \alpha_y z_0 + x_i^{mp}; \\ y_1 &= -\sin \alpha_x \sin \alpha_y x_0 + \cos \alpha_x y_0 + \cos \alpha_y \sin \alpha_x z_0 + y_i^{mp}; \\ z_1 &= -\cos \alpha_x \sin \alpha_y x_0 - \sin \alpha_x y_0 + \cos \alpha_x \cos \alpha_y z_0 + z_i^{mp}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Матрица перехода от системы координат $S_I(x_1, y_1, z_1)$ к системе координат $S_0(x_0, y_0, z_0)$:

$$M_0' = (M_p M_{\alpha_x} M_{\alpha_y})^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_y & -\sin \alpha_x \sin \alpha_y & -\cos \alpha_x \sin \alpha_y & z_i^{mp} \sin \alpha_y \cos \alpha_x - x_i^{mp} \cos \alpha_y + y_i^{mp} \sin \alpha_x \sin \alpha_y \\ 0 & \cos \alpha_x & -\sin \alpha_x & z_i^{mp} \sin \alpha_x - y_i^{mp} \cos \alpha_x \\ \sin \alpha_y & \cos \alpha_y \sin \alpha_x & \cos \alpha_x \cos \alpha_y & -x_i^{mp} \sin \alpha_y - y_i^{mp} \cos \alpha_y \sin \alpha_x - z_i^{mp} \cos \alpha_x \cos \alpha_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Система уравнений при переходе от системы координат $S_I(x_1, y_1, z_1)$ к системе координат $S_0(x_0, y_0, z_0)$:

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \cos \alpha_y x_1 - \sin \alpha_x \sin \alpha_y y_1 - \cos \alpha_x \sin \alpha_y z_1 + z_i^{mp} \sin \alpha_y \cos \alpha_x - x_i^{mp} \cos \alpha_y + y_i^{mp} \sin \alpha_x \sin \alpha_y; \\ y_0 &= \cos \alpha_x y_1 - \sin \alpha_x z_1 + z_i^{mp} \sin \alpha_x - y_i^{mp} \cos \alpha_x; \\ z_0 &= \sin \alpha_y x_1 + \cos \alpha_y \sin \alpha_x y_1 + \cos \alpha_x \cos \alpha_y z_1 - x_i^{mp} \sin \alpha_y - y_i^{mp} \cos \alpha_y \sin \alpha_x - z_i^{mp} \cos \alpha_x \cos \alpha_y. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

В систему уравнений (7) входит пять неизвестных: координаты рассматриваемой точки в системе координат x_1, y_1, z_1 и углы поворота систем координат при переходе в рассматриваемую точку на траектории относительного перемещения режущего инструмента α_x и α_y . При решении системы задаются значениями координат точки x_0, y_0, z_0 в системе режущего инструмента, например, координаты точки, принадлежащей одной из осей системы координат $S_0(x_0, y_0, z_0)$. Для решения системы (7) относительно входящих в нее неизвестных необходимо в нее добавить четвертое уравнение – уравнение профилирующей плоскости вида [9]:

$$A_{pi} \cdot x_1 + B_{pi} \cdot y_1 + C_{pi} \cdot z_1 + D_{pi} = 0, \quad (8)$$

где $A_{pi}, B_{pi}, C_{pi}, D_{pi}$ - постоянные коэффициенты в уравнении плоскости.

После чего, полученные выражения, записываются относительно двух точек, принадлежащих осям системы координат $S_0(x_0, y_0, z_0)$. В итоге получим систему из восьми уравнений для определения параметров перехода от системы координат $S_I(x_1, y_1, z_1)$ к системе координат $S_0(x_0, y_0, z_0)$:

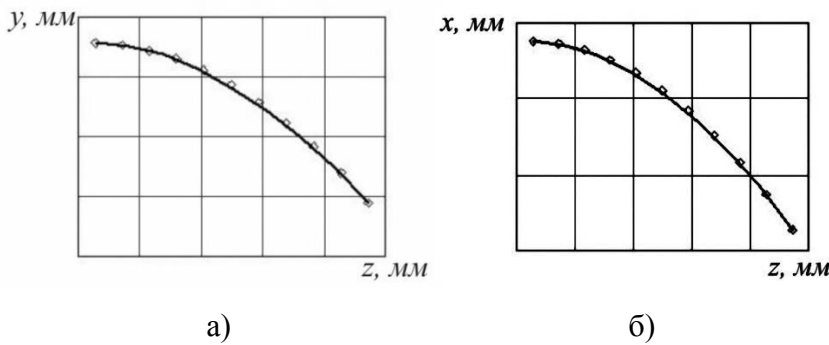
$$\left. \begin{aligned} 1 &= \cos \alpha_y x_{11} - \sin \alpha_x \sin \alpha_y y_{11} - \cos \alpha_x \sin \alpha_y z_{11} + z_i^{mp} \sin \alpha_y \cos \alpha_x - x_i^{mp} \cos \alpha_y + y_i^{mp} \sin \alpha_x \sin \alpha_y; \\ 0 &= \cos \alpha_x y_{11} - \sin \alpha_x z_{11} + z_i^{mp} \sin \alpha_x - y_i^{mp} \cos \alpha_x; \\ 0 &= \sin \alpha_y x_{11} + \cos \alpha_y \sin \alpha_x y_{11} + \cos \alpha_x \cos \alpha_y z_{11} - x_i^{mp} \sin \alpha_y - y_i^{mp} \cos \alpha_y \sin \alpha_x - z_i^{mp} \cos \alpha_x \cos \alpha_y; \\ A_{pi} \cdot x_{11} + B_{pi} \cdot y_{11} + C_{pi} \cdot z_{11} + D_{pi} &= 0 \\ 0 &= \cos \alpha_y x_{12} - \sin \alpha_x \sin \alpha_y y_{12} - \cos \alpha_x \sin \alpha_y z_{12} + z_i^{mp} \sin \alpha_y \cos \alpha_x - x_i^{mp} \cos \alpha_y + y_i^{mp} \sin \alpha_x \sin \alpha_y; \\ 1 &= \cos \alpha_x y_{12} - \sin \alpha_x z_{12} + z_i^{mp} \sin \alpha_x - y_i^{mp} \cos \alpha_x; \\ 0 &= \sin \alpha_y x_{12} + \cos \alpha_y \sin \alpha_x y_{12} + \cos \alpha_x \cos \alpha_y z_{12} - x_i^{mp} \sin \alpha_y - y_i^{mp} \cos \alpha_y \sin \alpha_x - z_i^{mp} \cos \alpha_x \cos \alpha_y; \\ A_{pi} \cdot x_{12} + B_{pi} \cdot y_{12} + C_{pi} \cdot z_{12} + D_{pi} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где x_{11}, y_{11}, z_{11} и x_{12}, y_{12}, z_{12} - координаты первой и второй точек, принадлежащих осям системы координат $S_0(x_0, y_0, z_0)$ в системе координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$.

Решив систему (9), определим значения координат точек, принадлежащих осям системы координат $S_0(x_0, y_0, z_0)$ в системе координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$ и значения углов поворота системы координат α_x и α_y для рассматриваемой точки траектории перемещения режущего инструмента. Составив и решив системы вида (9) для нескольких точек траектории вдоль линии зуба, определим распределение параметров перехода от системы координат $x_1y_1z_1$, связанной с шестерней к системе координат $x_0y_0z_0$, связанной с режущим инструментом.

Пространственная траектория перемещения режущего инструмента рис. 2. может быть, аппроксимирована сплайном Безье третьего порядка и задана системой уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} x_i^{mp} &= (1 - \lambda_i^{mp})^3 x_0^{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp})^2 \lambda_i^{mp} x_{1mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp}) \lambda_i^{mp2} x_{2mp} + \lambda_i^{mp3} x_n^{mp}; \\ y_i^{mp} &= (1 - \lambda_i^{mp})^3 y_0^{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp})^2 \lambda_i^{mp} y_{1mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp}) \lambda_i^{mp2} y_{2mp} + \lambda_i^{mp3} y_n^{mp}; \\ z_i^{mp} &= (1 - \lambda_i^{mp})^3 z_0^{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp})^2 \lambda_i^{mp} z_{1mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp}) \lambda_i^{mp2} z_{2mp} + \lambda_i^{mp3} z_n^{mp}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$



где $x_0^{mp}, y_0^{mp}, z_0^{mp}$ и $x_n^{mp}, y_n^{mp}, z_n^{mp}$ - координаты точек начала и конца траектории перемещения режущего инструмента; $x_{1mp}, y_{1mp}, z_{1mp}$ и $x_{2mp}, y_{2mp}, z_{2mp}$ - координаты опорных точек сплайна; λ_i^{mp} - i параметр сплайна.

Рисунок 2. Вид пространственной траектории относительного перемещения режущего инструмента, аппроксимированной сплайном Безье третьего порядка.

Профилирующая плоскости перпендикулярна траектории пере-

мещения режущего инструмента. Уравнение нормальной плоскости в общем виде определяется зависимостью [9]:

$$\frac{dx_i^{mp}}{d\lambda_i^{mp}} \cdot (x_1 - x_i^{mp}) + \frac{dy_i^{mp}}{d\lambda_i^{mp}} \cdot (y_1 - y_i^{mp}) + \frac{dz_i^{mp}}{d\lambda_i^{mp}} \cdot (z_1 - z_i^{mp}) = 0. \quad (11)$$

Производные координат системы уравнений (10) по параметру λ_i^{mp} сплайна определяются по зависимостям:

$$\begin{aligned} \frac{dx_i^{mp}}{d\lambda_i^{mp}} &= 3 \cdot \lambda_i^{mp2} x_n^{mp} - 3 \cdot \lambda_i^{mp2} x_{2mp} - 3 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1)^2 x_0^{mp} + 3 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1)^2 x_{1mp} + \\ &+ 6 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1) \lambda_i^{mp} x_{1mp} - 6 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1) \lambda_i^{mp} x_{2mp}; \\ \frac{dy_i^{mp}}{d\lambda_i^{mp}} &= 3 \cdot \lambda_i^{mp2} y_n^{mp} - 3 \cdot \lambda_i^{mp2} y_{2mp} - 3 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1)^2 y_0^{mp} + 3 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1)^2 y_{1mp} + \\ &+ 6 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1) \lambda_i^{mp} y_{1mp} - 6 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1) \lambda_i^{mp} y_{2mp}; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{dz_i^{mp}}{d\lambda_i^{mp}} = & 3 \cdot \lambda_i^{mp2} z_n^{mp} - 3 \cdot \lambda_i^{mp2} z_{2mp} - 3 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1)^2 z_0^{mp} + 3 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1)^2 z_{1mp} + \\ & + 6 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1) \lambda_i^{mp} z_{1mp} - 6 \cdot (\lambda_i^{mp} - 1) \lambda_i^{mp} z_{2mp}. \end{aligned}$$

Подставив зависимости (12) в уравнение нормальной плоскости (11) и раскрыв скобки, приведем уравнение нормальной плоскости к общему виду (8), где коэффициенты при координатах x_I, y_I, z_I равны производным по соответствующим координатам $A_{pi} = \frac{dx_i^{mp}}{d\lambda_i^{mp}}, B_{pi} = \frac{dy_i^{mp}}{d\lambda_i^{mp}}, C_{pi} = \frac{dz_i^{mp}}{d\lambda_i^{mp}}$ и определяются зависимостями (12), а свободный член определяется зависимостью:

$$D_{pi} = -A_{pi} x_i^{mp} - B_{pi} y_i^{mp} - C_{pi} z_i^{mp}. \quad (13)$$

Параметры перехода от системы координат $x_I y_I z_I$ к системе координат $x_0 y_0 z_0$ определяются для каждой точки траектории относительного перемещения режущего инструмента. При этом решаются системы уравнений вида (9). В результате решения системы уравнений (9), определяются значения координат точек, принадлежащих осям системы координат $S_0(x_0, y_0, z_0)$ в системе координат $S_I(x_I, y_I, z_I)$ и значения углов поворота системы координат α_x и α_y . В последующих расчетах, по определению элементов технологического обеспечения, используются только значения углов α_x и α_y , которые определяются в результате решения системы уравнений (9) с использованием результатов определения параметров профилирующих плоскостей (12) и (13), могут быть получены с использованием зависимостей:

$$\alpha_{xi} = \arctan \left(\frac{B_{pi}}{C_{pi}} \right); \quad (14)$$

$$\alpha_{yi} = \arctan \left(\frac{A_{pi}}{B_{pi} \sin \alpha_{xi} + C_{pi} \cos \alpha_{xi}} \right). \quad (15)$$

3. Выводы

В представленной работе получены основные зависимости по определению параметров перехода между системами координат режущего инструмента и шестерни с пространственно-модифицированными зубьями при многокоординатной обработке цилиндрических колес. Использование данных зависимостей позволяют определить параметры профилирующей плоскости в зависимости от параметров траектории перемещения режущего инструмента в пространстве. Это в рамках пространственного подхода к решению вопросов формообразования зубчатых венцов с пространственно-модифицированными зубьями на зубофрезерных операциях позволит:

- теоретически исследовать процессы нарезания зубчатых венцов с целью повышения геометрической точности зубьев,
- назначать наиболее рациональные режимные параметры обработки для непрерывно изменяющихся условий резания или определять резервы в повышении производительности процесса нарезания модифицированных зубчатых венцов цилиндрических колес.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Грубка, Р. М. Суммарные перемещения элементов цилиндрических передач внешнего зацепления, вызванные наличием погрешностей изготовления, монтажа и деформациями в процессе эксплуатации [Текст] / Р. М. Грубка, И. А. Петряева,

А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – № 1(60). – С. 19-24.

2. Грубка, Р. М. Обобщенные зависимости для пространственного соединения цилиндрических зубчатых колес, учитывающие наличие погрешностей и деформаций элементов передач [Текст] / Р. М. Грубка // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. - Донецк: ДонНТУ, 2018. – № 3(62). – С. 10-18.

3. Калашников, А. С. Технология изготовления зубчатых колес [Текст] / А. С. Калашников – М.: Машиностроение, 2004. – 480 с.

4. Грубка, Р. М. Методика определения параметров для настройки зубофрезерного станка при фрезеровании зубьев втулок зубчатых муфт с пространственной геометрией [Текст] / Р. М. Грубка, А. Н. Михайлов, С. И. Лучко // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: Донец. нац. техн. ун-т, 2011. – Вып. 41. – С. 112-118.

5. Грубка, Р. М. Фрезерование зубьев втулок муфт с геометрией приближенной к групповой пространственной методом обкатки на существующем серийном оборудовании [Текст] / Р. М. Грубка, А. Н. Михайлов, Л. Н. Феник, С. И. Лучко // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. - Донецьк: Донец. нац. техн. ун-т, 2011. – Вып. 42. – С. 98-103.

6. Грубка, Р. М. Классификация движений при многокоординатном зубофрезеровании пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических зубчатых колес методом копирования [Текст] / Р. М. Грубка, А. Н. Михайлов, И. А. Петряева// Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. - Донецк: ДонНТУ, 2019. – №3(66). – С. 16-21.

7. Грубка, Р. М. Классификация движений при многокоординатном зубофрезеровании пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес методом обкатки / Р. М. Грубка, А. Н. Михайлов, И. А. Петряева // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий: сб. тр. науч. Семинара / под ред. В. А. Лебедева; Донской гос. техн. ун - т. [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2020. – С. 240 - 247. – <https://ntb.donstu.ru/content/202091>.

8. Грубка, Р. М. Зубофрезерование методом копирования цилиндрических колес с пространственно-модифицированными зубьями / Р. М. Грубка, А. Н. Михайлов, А. В. Стёпочкина, И. А. Гуричев // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий: сб. тр. науч. семинара / под ред. В.А. Лебедева [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2021. – С. 242 - 247.

9. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 395 с.

Поступила в редколлегию 12.02.2021 г.