

УДК 621.833

**Р. М. Грубка**, канд. техн. наук, доцент, **А. Н. Михайлов**, д-р техн. наук, проф.,  
**И. А. Петряева**, канд. техн. наук, доцент

Донецкий национальный технический университет, ДНР

Тел./Факс: +38 (071) 3114221; E-mail: [grubka\\_roman@mail.ru](mailto:grubka_roman@mail.ru)

## КЛАССИФИКАЦИЯ ДВИЖЕНИЙ ПРИ МНОГОКООРДИНАТНОМ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЗУБЬЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС МЕТОДОМ КОПИРОВАНИЯ

*В статье представлена классификация видов относительных движений режущего инструмента при многокоординатном зубофрезеровании пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических зубчатых колес методом копирования. В качестве инструмента рассматриваются относительные движения пальцевых или дисковых модульных фрез при многокоординатной обработке зубчатых венцов. Траектории относительного перемещения режущего инструмента делятся на прямолинейные и криволинейные, расположенные на плоскости или в пространстве. Траектории могут быть простые, составленные из отрезков или кривых одного вида и комбинированные, составленные из разного сочетания по виду и расположению простых траекторий.*

**Ключевые слова:** цилиндрическая зубчатая передача, зубчатый венец, боковая поверхность зубьев, классификация, модификация зубьев, метод копирования, траектория относительного перемещения, режущий инструмент

**R. M. Grubka, A. N. Mikhaylov, I. A. Petryaeva**

## CLASSIFICATION OF MOVEMENTS AT MULTIPLE-ORDINARY GEAR MILLING OF SPATIALLY MODIFIED TEETHS OF CYLINDRICAL GEAR WHEELS BY COPIES METHOD

*The article presents the classification of cutting tool relative movements types with multi-coordinate gear cutting of spur gears spatially modified teeth using the copy method. As a tool, relative movements of finger or disk modular milling cutters are considered for multi-axis machining of gear rims. The trajectories of the cutting tool relative movement are divided into straight and curvilinear, located on a plane or in space. Trajectories can be simple, made up of segments or curves of the same type and combined, made up of different combinations of the type and simple trajectories location.*

**Keywords:** spur gear, gear ring, side surface of teeth, classification, modification of teeth, copying method, relative displacement path, cutting tool

### 1. Введение

Вопросы разработки технологического обеспечения в соответствии с системой комплексного функционально-ориентированного конструкторско-технологического подхода включают решение задач синтеза структуры технологических процессов изготовления элементов зубчатых передач, сборки узлов и агрегатов с зубчатыми колесами [1]. Технологические процессы разрабатываются в зависимости от конкретных производственных условий на основе традиционных, комбинированных и новых технологий и схем формообразования элементов зубчатых колес и элементов зубчатых передач.

Структура технологического процесса и операций, входящих в него, предполагают постановку в соответствие геометрических параметров, эксплуатационных функций и характеристик цилиндрических зубчатых колес и зубчатых передач на их основе технологическим воздействиям, которые необходимо осуществить для получения заданной геометрии боковой поверхности зубьев и обеспечения искомых точности и качества рабочих поверхностей, функций и характеристик зубчатых колес и передач при требуемой программе выпуска изделий [1]. На этапе технологической подготовки производства так же решаются задачи по выбору или разработке технологического оборудования, технологического оснащения, ре-

жущего инструмента, рассчитываются траектории относительных движений инструмента и заготовки для всех операций, назначаются и рассчитываются режимы резания.

Технология изготовления цилиндрических зубчатых колес с наружными зубьями с продольной модификацией приведены в работах [2, 3, 4]. Каждый из технологических способов нарезания зубьев позволяет решить одну конкретную технологическую задачу по получению зубчатого венца с той или иной геометрией зубьев. При этом отсутствуют обобщенные расчетные методики для определения элементов технологического обеспечения изготовления зубчатых венцов с пространственной геометрией зубьев произвольной формы, способной компенсировать все погрешности изготовления и монтажа, а также перемещения вызванные деформациями в процессе эксплуатации под рабочей нагрузкой [5, 6].

Получение теоретически точной пространственной геометрии возможно при выполнении двух условий (второй способ Оливье) [7]:

- придание инструменту в процессе обработки движения подачи по специальной траектории или придание заготовке дополнительного пространственного движения, соответствующего относительному движению зубчатых колес в зубчатом соединении в процессе эксплуатации;

- использование инструмента (по крайней мере, на последней стадии обработки), идентичного детали сопрягаемой с обрабатываемым изделием.

Выполнение двух условий второго способа Оливье практически реализуемо на операциях финишной обработки зубчатых венцов. Тогда как на операциях предварительного формообразования зубчатых венцов применение универсального зуборезного оборудования и зуборезных станков с ЧПУ позволяет получать зубья геометрия боковой поверхности которых приближена к заданной пространственной [8, 9]. Геометрия, приближенная к заданной пространственной в ряде случаев может применяться для менее ответственных зубчатых соединений, может нарезаться при черновой обработке спуском под последующую обработку. Изготовление зубчатых колес может вестись как стандартным зуборезным, так и специально спроектированным инструментом на существующем технологическом оборудовании. Повышение эксплуатационных показателей зубчатых колес и передач на их основе за счет снижения влияния погрешностей и деформаций на эксплуатационные параметры передач путем модификации боковой поверхности зубьев [10, 11, 12, 13, 14] и исследование процессов формообразования зубчатых венцов с модифицированными зубьями является актуальной научной задачей.

**Цель работы:** разработка классификации движений при многокоординатном зубофрезеровании пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических зубчатых колес методом копирования.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Цилиндрические зубчатые колеса в большинстве своем нарезаются с эвольвентным профилем. В процессе нарезания зубьев эвольвентный профиль может смещаться в том или ином направлении для реализации заданной геометрии на боковой поверхности зубьев [8, 9]. Так у зубьев с прямолинейной образующей профилирующая плоскость режущего инструмента перпендикулярна оси вращения заготовки и эвольвента образуется в торцовом сечении зубчатого венца. У косозубых колес профилирующая плоскость расположена под углом к оси вращения заготовки, поэтому соответственно изменяется и положение нарезаемой эвольвенты. Зубья с продольной модификацией получают, как правило, смещая инструмент в радиальном направлении, а так как профилирующая плоскость располагается перпендику-

лярно траектории относительного перемещения РИ, соответственно, будет меняться и угол наклона профилирующей плоскости, и положение принадлежащей ей эвольвенты.

Получение зубьев с геометрией приближенной к заданной пространственной методом копирования может быть реализовано следующими способами:

- методом копирования с использованием стандартного режущего инструмента (пальцевой или дисковой модульных фрез) и существующего технологического оборудования;

- методом копирования с использованием специально спрофилированного инструмента и существующего технологического оборудования.

Для более близкого приближения геометрии к теоретически точной необходимо найти такое положение профилирующей плоскости и принадлежащей ей эвольвенты в пространстве, чтобы минимизировать отклонения от эвольвенты теоретически точного профиля боковой поверхности зубьев во всех сечениях по их длине.

Достичь требуемого результата можно при постановке и решении пространственных технологических задач разработки технологического обеспечения обработки зубчатых венцов с пространственными геометриями зубьев методом копирования. Т.е. к переходу от традиционных схем обработки зубчатых венцов к их многокоординатной обработке. При этом режущий инструмент в относительном движении может перемещаться в различных плоскостях, по прямолинейным, криволинейным и пространственным траекториям, за счет чего и достигается наибольшее приближение нарезаемой приближенной пространственной геометрии к теоретической.

Поставленная задача по определению технологического обеспечения многокоординатной обработки решается получением аналитических зависимостей определяющих взаимосвязь между функциональными свойствами зубчатых колес и зубчатых передач на их основе, характеристиками передач и технологическими воздействиями, которые необходимо осуществить для достижения искомых функциональных свойств и характеристик [1]. Отражением функциональных свойств и характеристик зубчатых колес и передач на их основе является обеспечение сопряжения двух зубчатых колес, которое отвечает требованиям условий эксплуатации, и основывается на пространственной геометрии боковой поверхности зубьев, способной компенсировать все возможные погрешности изготовления и монтажа, а также перемещения, возникающие в процессе эксплуатации под действием рабочей нагрузки. С другой стороны при выборе технологических воздействий для получения зубчатых изделий с пространственной геометрией зубьев необходимо отыскать взаимосвязь между геометрией режущей кромки инструмента, геометрией боковой поверхности нарезаемых зубьев и кинематикой относительных движений инструмента и заготовки в процессе формообразования зубчатого венца [15, 16].

Траектории относительного перемещения могут быть простые, составленные из отрезков или кривых одного вида и комбинированные, составленные из разного сочетания по виду и расположению простых траекторий. Возможные варианты видов простых траектории представлены в табл. 1.

Комбинированные траектории относительного перемещения РИ, составленные из разного сочетания по виду и расположению простых траекторий могут быть разделены на:

- линейные пространственные – состоящие из отрезков расположенных в различных сочетаниях в пространстве;
- криволинейные плоские – состоящие из сопряжённых участков различных кривых расположенных в одной плоскости;
- криволинейные пространственные – состоящие из сопряжённых участков различных кривых расположенных в пространстве;

Таблица 1. – Виды траекторий относительного перемещения РИ

Наименование	Изображение	Изменяемые координаты	Область применения
1	2	3	4
<b>1. Прямолинейные траектории</b>			
1.1 Параллельная оси вращения		Z	Обработка зубьев с прямолинейной образующей
1.2 Наклонная радиальная		Y и Z	Обработка наклонных зубьев
1.3 Наклонная тангенциальная		X и Z	Обработка косозубых зубьев
1.4 Наклонная пространственная		X, Y и Z	Обработка зубьев с пространственной геометрией
<b>2. Криволинейные плоские траектории</b>			
2.1 Радиальная положительная		Y и Z	Продольная модификация, пространственная геометрия, выпуклый зуб
2.2 Радиальная отрицательная		Y и Z	Продольная модификация, пространственная геометрия, вогнутый зуб
2.3 Тангенциальная положительная		X и Z	Продольная модификация, пространственная геометрия, выпуклый зуб
2.4 Тангенциальная отрицательная		X и Z	Продольная модификация, пространственная геометрия, вогнутый зуб
2.5 Тангенциальная разнонаправленная положительная		X и Z	Продольная модификация, пространственная геометрия, нарезаемые на противоположных частях боковой поверхности зубьев, выпуклый зуб
2.6 Тангенциальная разнонаправленная отрицательная		X и Z	Продольная модификация, пространственная геометрия, нарезаемые на противоположных частях боковой поверхности зубьев, вогнутый зуб
<b>3. Криволинейные пространственные траектории</b>			
3.1 Пространственная положительная		X, Y и Z	Пространственная геометрия, выпуклый зуб
3.2 Пространственная отрицательная		X, Y и Z	Пространственная геометрия, вогнутый зуб

3.3 Пространственная разнонаправленная положительная		X, Y и Z	Продольная модификация, пространственная геометрия, нарезаемые на противоположных частях боковой поверхности зубьев, выпуклый зуб
3.4 Пространственная разнонаправленная отрицательная		X, Y и Z	Продольная модификация, пространственная геометрия, нарезаемые на противоположных частях боковой поверхности зубьев, вогнутый зуб

- линейно криволинейно плоские – состоящие из отрезков и различных кривых принадлежащих одной плоскости;

- линейно криволинейно пространственные – состоящие из отрезков и различных кривых расположенных в пространстве.

### 3. Выводы

Таким образом, разработана классификация видов относительных движений режущего инструмента при многокоординатном зубофрезеровании пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических зубчатых колес методом копирования. Пространственный подход к решению вопросов формообразования и многокоординатная обработка зубчатых венцов с пространственными геометриями на зубофрезерных операциях позволяет получить наиболее приближение теоретической и реально нарезаемой геометрии. Рассмотрение пространственной задачи формообразования зубчатых венцов методом копирования позволит определить наиболее рациональные режимные параметры обработки для непрерывно изменяющихся условий резания и определить резервы в повышении производительности процесса нарезания модифицированных зубчатых венцов цилиндрических колес.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Грубка, Р. М. Повышение надежности, долговечности и нагрузочной способности цилиндрических зубчатых передач на базе комплексного функционально-ориентированного конструкторско-технологического подхода [Текст] / Р. М. Грубка // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Вып. 2 (61). – С. 15 - 22.

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

3. Пат. 944824 СССР, МПК В 23 F 9/00 Способ обработки зубчатых колёс / Данилов В. А.; заявитель и патентообладатель Новополоцкий политехнический институт. – №3005693/25—08; заявл. 19.11.80; опубл. 23.07.82, Бюл. № 27. – 2 с.: ил.

4. Пат. 685451 СССР, МПК В 23 F 1/00 Способ обработки зубчатых колёс / Тернюк Н. Э., Варшавский В. Б., Хлус А. А. – №2418078/25-08; заявл. 04.11.76; опубл. 15.09.79, Бюл. № 34. – 2 с.: ил.

5. Грубка, Р. М. Суммарные перемещения элементов цилиндрических передач внешнего зацепления, вызванные наличием погрешностей изготовления, монтажа и деформациями в процессе эксплуатации [Текст] / Грубка Р. М., Петряева И. А., Михайлов А. Н. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Вып. 1 (60). – С. 19 - 24.

6. 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. – Вып. 3(62). – С. 10 - 18.

7. Грубка Р. М. Особенности технологии изготовления зубьев втулок зубчатых муфт с групповой пространственной геометрией [Текст] / Р. М. Грубка, А. Н. Михайлов // Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы: Материалы седьмого Международного научно-практического семинара в г. Таганроге 19–21 июня 2006 г. В 3 кн. – Таганрог: ТРТУ, 2006. – Кн. 3. – С. 86-90.

8. 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. – Вип. 41. – С. 112-118.

9. 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. – Вип. 42. – С. 98-103.

10. Рязанцева, И. Л. О профильной модификации тяжело нагруженных зубчатых колес [Текст] / И. Л. Рязанцева // Омский научный вестник. – 2000. – №2(100). – С. 73 - 76.

11. Сухоруков, Ю. Н. Модификация эвольвентных зубчатых колёс: Справочник [Текст] / Ю. Н. Сухоруков. – К.: Техника, 1992. – 197 с.

12. Лагутин, С. А. Сочетание продольной и профильной модификации зубьев в цилиндрических передачах [Текст] / С. А. Лагутин // Конверсия в машиностроении. – 2001. – № 2. – С. 68 - 72.

13. Михайлов, А. Н. Основы синтеза геометрии внутренних пространственных зацеплений с равным числом внутренних и наружных зубьев [Текст] / А. Н. Михайлов, С. А. Рыбина, Д. В. Перов, Т. Оливер // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – Вып. 10. – С.149-161.

14. Грубка, Р. М. Синтез пространственных геометрий зубьев цилиндрических колес, работающих при наличии погрешностей и деформаций элементов передач [Текст] / Р. М. Грубка, И. А. Петряева, А. Н. Михайлов, А. А. Бочаров // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Вып. 4 (63). – С. 17 - 27.

15. Грубка Р. М. Аппроксимация координат точек профиля дисковой зуборезной модульной фрезы сплайнами Безье [Текст] / Р. М. Грубка, И. А. Петряева, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. 2017. – №3 (58). – С. 8 - 15.

16. Грубка Р. М. Аппроксимация профиля зуба дисковой зуборезной модульной фрезы сплайнами Безье [Текст] / Р. М. Грубка, А. Н. Михайлов, И. А. Петряева // Известия ТулГУ. Технические науки. – Вып. 4. – Тула: ТулГУ, 2018. – С. 262 - 271

Поступила в редколлегию 15.04.2019 г.