

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Грубка Роман Михайлович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ
ОБРАБОТКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС ПУТЕМ
ОРИЕНТИРОВАННОЙ МНОГОКООРДИНАТНОЙ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ ЗУБЬЕВ**

05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Донецк – 2019

Работа выполнена в ГОСУДАРСТВЕННОМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ
УЧРЕЖДЕНИИ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
г. Донецк

Научный консультант: **Михайлов Александр Николаевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные
оппоненты:

Ведущая организация:

Защита состоится «__» _____ 2020 года в ____ часов на заседании
диссертационного совета Д 01.014.02 при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по адресу: ауд. 6.202,а,
пр. Дзержинского, 1, г. Донецк, 283001.

Тел: +380 71 3060879, e-mail: tm@fimm.donntu.org

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по адресу: корпус 2,
ул. Артёма, 58, г. Донецк, 283001

<http://donntu.org>

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 01.014.02

Еронько С.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Важнейшей задачей в машиностроении является проектирование и изготовление конкурентоспособных машин и агрегатов и обеспечение их высоких эксплуатационных характеристик. Решение этой задачи в значительной степени зависит от качества и эффективности изготовления и сборки отдельных деталей, в том числе и цилиндрических эвольвентных зубчатых колес и передач на их основе. Развитие техники и технологии приводит к повышению требований к показателям надежности, долговечности, нагрузочной способности при сохранении или уменьшении габаритных размеров цилиндрических зубчатых передач. Выполнение указанных требований возможно либо за счет увеличения точности зубчатых колес, что не всегда экономически целесообразно, либо за счет изменения их конструкции, в том числе модификацией боковой поверхности зубьев.

Работоспособность изделий с зубчатыми венцами зависит от вида и величины перемещений, которые вызваны наличием погрешностей их изготовления, монтажа и деформаций элементов зубчатых передач под действием нагрузки. Наличие погрешностей приводит к пространственному характеру контактирования зубьев в соединении и к необходимости синтеза пространственных геометрий боковой поверхности зубьев. Учёт погрешностей при синтезе новых геометрий зубьев приводит к созданию новой элементной базы и, как следствие, к необходимости совершенствования технологии изготовления зубчатых венцов.

Зубчатые колеса являются одними из самых сложных и трудоемких в изготовлении деталей, поэтому вопросам повышения производительности и точности изготовления зубчатых венцов уделяется повышенное внимание. Зубья с пространственной геометрией по своей структуре существенно отличаются от зубьев с прямолинейной или криволинейной образующей. Технологические способы формообразования таких зубчатых венцов основываются на соблюдении двух условий второго способа Оливье и применении специального технологического оборудования и РИ. Вместе с тем универсальное зуборезное оборудование и зуборезные станки с ЧПУ могут быть использованы для получения зубчатых венцов с геометриями приближенными к заданным пространственным.

Основным направлением развития механообработки на данный момент является использование многокоординатного оборудования с ЧПУ. Точность методов обкатки и единичного деления при применении оборудования с ЧПУ практически совпадают, поэтому появляется возможность получить значительный эффект путем многокоординатной обработки зубчатых венцов.

Зубчатые передачи в конструктивном, технологическом и метрологическом отношении являются одними из наиболее сложных элементов машин и агрегатов. Рост требований к качеству зубчатых колес приводит к непрерывному совершенствованию и усложнению методов их проектирования, технологий изготовления, средств и методов контроля. Развитие методов анализа процессов зубообработки затрудняет сложность как геометрии самих изделий, геометрии РИ, так и кинематики относительных движений инструмента и заготовки. Для широкого применения пространственных соединений цилиндрических зубчатых колес необходима

разработка универсальных комплексных геометрий зубьев, использование универсального математического описания, как самих геометрий боковой поверхности зубьев, так и процессов, происходящих во время формообразования зубчатых венцов, что, в конечном счете, определяет актуальность представленной работы.

Степень разработанности темы. Вопросам синтеза, совершенствования конструкции и технологии изготовления цилиндрических традиционных эвольвентных и пространственных зубчатых передач посвящено большое количество научных работ. Выполненный анализ позволил установить, что в настоящее время при синтезе зубчатых передач не учитывают комплексное действие погрешностей изготовления элементов и монтажа элементов зубчатых передач и наличие деформаций их элементов во время эксплуатации. Взаимодействия в соединениях идеализированы и не учитывают реальные процессы, происходящие при наличии перемещений венцов, вызванных погрешностями и деформациями. Вследствие чего не удастся обеспечить заданный характер контактирования зубьев, что приводит к снижению эксплуатационных характеристик, нагрузочной способности и долговечности передачи.

Известные технологические способы повышения надежности и долговечности зубчатых колес и передач, применяемое технологическое оборудование и РИ базируются на традиционных методах изготовления зубьев цилиндрических колес. Специальное оборудование и РИ, применяемые для обработки зубчатых венцов с пространственной геометрией ограничены, как по конструкции зубчатых колес, так и по геометрии нарезаемых зубьев.

Дальнейшее совершенствование зубчатых соединений цилиндрических колес возможно при переходе к пространственному рассмотрению процессов, происходящих в реальном зацеплении с учетом технологических и эксплуатационных факторов и в процессе формообразования зубчатых венцов.

Цель и задачи исследования. Целью работы является повышение точности многокоординатного фрезерования пространственно модифицированных зубьев цилиндрических колес, соединения на основе которых способны компенсировать комплекс перемещений, вызванных наличием погрешностей изготовления, монтажа и деформаций элементов зубчатых передач в процессе эксплуатации, за счет пространственного подхода к решению технологических задач и аналитического описания взаимосвязи элементов процесса формообразования.

Для достижения поставленной цели, в работе необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ существующих методик синтеза соединений зубьев цилиндрических передач, эксплуатирующихся при наличии различного рода погрешностей, рассмотреть существующие конструктивные и технологические методы повышения надежности, долговечности и нагрузочной способности цилиндрических передач, изучить влияние погрешностей зубчатых венцов на эксплуатационные характеристики передач и способы контроля параметров их точности. Обосновать необходимость совершенствования конструкции цилиндрических колес с пространственной геометрией зубьев, технологических способов их изготовления и методов контроля.

2. Разработать комплексный конструкторско-технологический подход по повышению надежности, долговечности и нагрузочной способности цилиндрических зубчатых передач, который основывается на проектировании и изготовлении зубчатых колес с пространственной геометрией боковой поверхности зубьев, способной компенсировать комплекс перемещений и поворотов сопряженных зубчатых венцов, вызванных наличием погрешностей изготовления, монтажа и деформациями элементов зубчатых передач под действием рабочей нагрузки.

3. Разработать методологию синтеза пространственных соединений цилиндрических зубчатых колес, способных компенсировать комплекс перемещений и поворотов сопряженных зубчатых венцов, вызванных наличием погрешностей изготовления, монтажа и деформаций элементов зубчатых передач.

4. Разработать элементы технологического обеспечения для повышения точности многокоординатного фрезерования пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес методом копирования путем аналитического описания взаимосвязи элементов процесса формообразования.

5. Разработать элементы технологического обеспечения для повышения точности многокоординатного фрезерования пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес методом обкатки путем аналитического описания взаимосвязи элементов процесса формообразования.

6. Разработать теоретические основы контроля зубчатых венцов цилиндрических зубчатых колес с пространственной геометрией зубьев.

7. Разработать рекомендации по выполнению элементов работ на этапе технологической подготовки производства цилиндрических зубчатых венцов с пространственными геометриями.

8. Выполнить экспериментальные исследования по получению зубчатых венцов с комплексной пространственной геометрией зубьев методом обкатки на существующем серийном оборудовании стандартным РИ. Внедрить результаты работы в производство.

Объект исследования - параметры процесса формообразования зубьев цилиндрических зубчатых колес с пространственной геометрией, компенсирующей комплекс погрешностей и деформаций элементов передач.

Предмет исследования - закономерности процесса формообразования зубьев с комплексной пространственной геометрией и связь кинематики относительных движений РИ и заготовки, структуры пространственной геометрии зубьев и геометрии режущей кромки инструмента.

Научная новизна полученных результатов.

1. Впервые предложена методология синтеза соединений цилиндрических колес внешнего и внутреннего зацеплений, компенсирующих комплексное действие погрешностей и деформаций элементов зубчатых передач.

2. Впервые предложен пространственный подход к решению задач формообразования цилиндрических колес зубофрезерованием методом копирования, позволяющий повысить геометрическую точность зубьев с пространственной геометрией боковой поверхности.

3. Впервые разработана методика аналитического определения координат точек пространственной траектории относительного перемещения РИ, работаю-

щего по методу копирования, в зависимости от геометрии боковой поверхности зубьев и геометрии режущей кромки инструмента.

4. Впервые разработана методика определения параметров срезаемого слоя при многокоординатном зубофрезеровании методом копирования основанная на пространственном подходе к решению задачи формообразования.

5. Впервые предложен пространственный подход к решению задач формообразования цилиндрических колес зубофрезерованием методом обкатки, позволяющий повысить геометрическую точность зубьев с пространственной геометрией боковой поверхности.

6. Впервые разработана методика аналитического определения координат точек пространственной траектории относительного перемещения РИ, работающего по методу обкатки, в зависимости от геометрии боковой поверхности зубьев и геометрии режущей кромки инструмента.

Теоретическая значимость работы.

1. На базе функционально-ориентированного конструкторско-технологического подхода (ФОКТП) предложена система повышения надежности, долговечности и нагрузочной способности цилиндрических зубчатых передач.

2. Предложено развитие кинематического метода синтеза соединений пространственных зубчатых цилиндрических колес, компенсирующих комплексное действие погрешностей и деформаций элементов зубчатых передач.

3. Разработаны элементы технологического обеспечения ФОКТП изготовления цилиндрических колес с пространственной геометрией боковой поверхности зуба при многокоординатном зубофрезеровании методом копирования.

4. Разработаны элементы технологического обеспечения ФОКТП изготовления цилиндрических колес с пространственной геометрией боковой поверхности зуба при многокоординатном зубофрезеровании методом обкатки.

5. Установлены закономерности процесса формообразования, позволяющие повысить геометрическую точность нарезания пространственно-модифицированных зубьев.

6. Предложено, с целью сокращения сроков выполнения работ по конструкторско-технологической подготовке производства изделий с пространственно-модифицированными зубчатыми венцами, боковую поверхность зуба описывать семейством трехмерных сплайнов Безье.

7. Разработаны теоретические основы получения и обработки измерительной информации на технологических операциях контроля геометрических параметров пространственно-модифицированных зубчатых венцов цилиндрических колес с использованием цифровой измерительной техники.

8. Классифицированы виды модификаций элементов зубчатых венцов и способы формообразования модифицированных зубьев цилиндрических колес.

Практическая значимость работы.

1. Перемещение РИ по пространственной криволинейной траектории при многокоординатном зубофрезеровании пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес методами копирования и обкатки приводит к повышению геометрической точности нарезания зубьев. Минимизация отклонения координат по толщине зуба, от их теоретических значений, обеспечивается не-

прерывным изменением положения профилирующей плоскости в процессе формообразования. Отклонение координат по толщине зуба составляет:

- при обработке дисковой модульной фрезой - для специально спрофилированного РИ до 3%, для стандартного РИ – до 5%;
- при обработке червячной фрезой с перемещением РИ по пространственной траектории не более 5%, с тангенциальным смещением РИ и постоянным значением радиальной коррекции – не более 9%.

2. Разработан ФОКТП повышения надежности, долговечности и нагрузочной способности цилиндрических зубчатых передач, реализация которого на практике позволит осуществлять как сквозное, так и итерационное проектирование цилиндрических зубчатых колес с пространственной геометрией боковой поверхности зубьев, способных компенсировать комплекс погрешностей и деформаций элементов передач.

3. В работе представлены рекомендации по синтезу соединений цилиндрических зубчатых колес внешнего и внутреннего зацеплений с пространственными геометриями, компенсирующих комплекс погрешностей и деформаций элементов зубчатых передач. Применение на практике таких зубчатых соединений позволяет повысить эксплуатационные характеристики цилиндрических передач за счет обеспечения линейного контакта зубьев и исключения кромочного контакта.

4. Аппроксимация боковой поверхности зубьев сплайнами Безье позволяет сократить сроки выполнения этапов конструкторской и технологической подготовки производства зубчатых венцов с пространственными геометриями за счет автоматизации работ с использованием современной компьютерной техники и пакетов прикладных программ. Относительная погрешность в определении координат не превышает 1%.

5. Изложенные в работе рекомендации по разработке элементов технологического обеспечения позволяют проектировать технологические процессы изготовления зубчатых венцов цилиндрических колес, как с предложенной пространственной геометрией, так и с геометрией, приближенной к ней, в условиях всех типов производств.

6. В работе приведены рекомендации по определению параметров для настройки зубофрезерных станков, что позволяет выполнять нарезание пространственно-модифицированных зубьев на существующем серийном оборудовании стандартным РИ.

7. Разработаны рекомендации по контролю геометрических параметров зубчатых венцов с пространственными геометриями зубьев, позволяющие автоматизировать обработку результатов измерений геометрических параметров зубьев, с учетом непрерывного изменения толщины зубьев в зависимости от координаты по их высоте и длине, с применением цифровой измерительной техники.

8. Разработаны алгоритмы назначения режимных параметров обработки пространственно-модифицированных зубьев методом копирования, позволяющие снизить трудоемкость расчетных операций.

9. Результаты работы внедрены в ООО «Донвентилятор» (г. Ростов-на-Дону, Россия), ООО «Горловский энергомеханический завод» (г. Горловка, ДНР), ГОУВПО «ДОННТУ» (г. Донецк, ДНР), в Филиале Ухтинского государственного

технического университета в г. Усинске (Республика Коми, Россия), ООО «НПО «Группа компаний машиностроения и приборостроения» (г. Брянск, Россия), АО «ФЕОДОСИЙСКИЙ ОПТИЧЕСКИЙ ЗАВОД» (г. Феодосия, Россия), ООО «Озеряновский машиностроительный завод «Технология» (г. Горловка, ДНР). Общий ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы составит 1298000,00 рублей РФ (один миллион двести девяносто восемь тысяч рублей РФ).

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач исследования и получения результатов, обладающих новизной, использован комплекс методов и научных положений технологии машиностроения, теории резания, теории механизмов и машин, аналитической геометрии в пространстве и на плоскости; для решения тригонометрических уравнений и систем нелинейных уравнений, получены аналитические решения и/или применены методы численного поиска решений. Результаты теоретических исследований получены с необходимой точностью и подтверждены результатами экспериментальных исследований. Расчеты выполнены на ПК с применением пакетов прикладных программ.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие научные разработки и положения:

- дальнейшее повышение надежности, долговечности и несущей способности цилиндрических зубчатых передач обеспечивается синтезом пространственных соединений, компенсирующих комплекс погрешностей и деформаций, путем обеспечения линейного контакта между сопряженными зубьями;

- многокоординатное зубофрезерование пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес позволяет минимизировать отклонения нарезаемого профиля зуба от теоретического профиля, тем самым повысить точность обработки за счет аналитического определения параметров взаимосвязи геометрии боковой поверхности зубьев, геометрии режущей кромки инструмента и параметров траектории относительного перемещения РИ в пространстве;

- решение пространственной задачи формообразования зубчатых венцов с пространственной геометрией зубьев методом копирования позволяет обеспечить постоянство параметров срезаемых слоев путем аналитического определения изменения значения подачи на зуб РИ в зависимости от кривизны траектории относительного перемещения РИ и геометрии его режущей кромки;

- аналитические зависимости, являющиеся решением пространственных задач формообразования зубчатых венцов с комплексной пространственной геометрией зубьев, которые позволяют автоматизировать расчеты, выполняемые в процессе технологической подготовки производства при определении параметров для настройки зубофрезерных станков;

- аналитические зависимости, позволяющие автоматизировать выполнение контроля точности изготовления зубчатых венцов с пространственными геометриями зубьев с использованием современного цифрового оборудования.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается корректностью использования математического аппарата и научных теорий, применением современного оборудования; допустимой сходимостью результатов теоретических и экспери-

ментальных исследований, эффективностью внедрения результатов исследования на промышленных предприятиях.

Основные положения и результаты исследования, которые представлены в диссертации, были представлены и обсуждены: на международных научно-технических конференциях: 3-я Международная Научно-техническая конференция «Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения (ТМ - 2011)» (г. Брянск, Россия, 2011 г.); ModTech International Conference (Румыния, 2012г.); на международном научно-техническом семинаре «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы» (г. Таганрог, Россия, 2011г., 2012г., 2013г., 2014г.); «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, Россия, 2013г., 2014г., 2016г., 2017г., 2018г., 2019г.); «Комплексные проблемы техногенной безопасности» (г. Воронеж, Россия, 2017г.); Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности» (г. Таганрог, Россия, 2018г.); научный семинар, посвященный памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, почетного профессора ДГТУ А.П. Бабичева (г. Ростов-на-Дону, Россия, 2019 г.); XVII Международная научно-техническая конференция «Чтения памяти В.Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (г. Екатеринбург, Россия, 2019 г.); XVIII Всероссийская с международным участием научно-техническая конференция «МЕХАНИКИ XXI ВЕКУ» (г. Братск, Россия, 2019 г.); Научный симпозиум технологов – машиностроителей (с международным участием) «Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий» (п. Дивноморское, Россия, 2019г.). В полном объеме диссертация докладывалась на расширенном семинаре кафедры «Технология машиностроения» ГОУВПО «ДОННТУ».

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 33 научно-технических работах, в том числе: 13 статей в ведущих рецензируемых изданиях ВАК ДНР, имеющих РИНЦ; 3 статьи в ведущих рецензируемых журналах ВАК России, имеющем РИНЦ; 17 публикаций в материалах международных конференций, в том числе в сборниках, входящих в международные наукометрические базы данных.

Структура и объем работы. Работа состоит из титульного листа, оглавления, введения, шести разделов, заключения, списка литературы и приложений. Полный объем диссертации составляет 339 страниц, в том числе 252 страницы основного текста, 73 рисунка, 6 таблиц, 415 литературных источников на 47 страницах, 5 приложений на 22 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел «**Современное состояние вопроса исследования**».

Вопросам синтеза, совершенствования конструкции и технологии изготовления цилиндрических эвольвентных плоских и пространственных зубчатых передач посвящены работы следующих учёных: Айрапетова Э.Л., Бабичева Д.Т.,

Болотовского И.А., Верховского В.А., Волкова А.Е., Вулгакова Э.Б., Гавриленко В.А., Гейнца Р., Генкина М.Д., Гонского Г.В., Громан М.Б., Дасукэ С., Дусева И.И., Ерихова М.Л., Заблонского К.И., Калашникова Н.А., Калашникова С.Н., Каргополова Г.Ф., Като Е., Кетова Х.Ф., Кораблёва А.И., Коростелева Л.В., Косарева О.И., Коськина В.Н., Кудрявцева В.Н., Лагутина С.А., Лашнева С.И., Литвина Ф.Л., Михайлова А.Н., Начинкина В.П., Перепелицы Б.А., Плотникова В.С., Полякова В.С., Радзевича С.П., Решетова Л.Н., Роббера А.И., Родина П.Р., Сапонджяна Г.А., Сегаль М.Г., Стажарова А.И., Сызранцева В.Н., Тевса Н.Г., Тимофеева В.И., Уткина Б.С., Филипова В.М., Часовщикова Л.Д., Шевелевой Г.И., Эльштейна Л.Б. и многих других.

В результате анализа систем синтеза и оптимизации цилиндрических зубчатых колес и передач установлено, что при проектировании зубчатых венцов не учитывают комплексное действие погрешностей изготовления, погрешностей монтажа и деформаций элементов передач во время эксплуатации под действием рабочих нагрузок. Вследствие чего не удастся обеспечить заданный характер контактирования зубьев, что приводит к снижению эксплуатационных характеристик передач, а также влечет за собой снижение нагрузочной способности и долговечности передачи. А известные конструктивные и технологические подходы по повышению нагрузочной и компенсирующей способности цилиндрических зубчатых колес не позволяют создавать универсальные конструкции зубчатых передач, способных компенсировать все негативные эксплуатационные факторы.

Вместе с тем применение существующего серийного оборудования, учет пространственного характера контактирования зубьев в зубчатом соединении во время эксплуатации и пространственная постановка технологической задачи формообразования зубчатых венцов позволит максимально приблизить параметры нарезаемых зубьев с пространственной геометрией к параметрам зубьев с соответствующей теоретической геометрией. Решение технологических задач нарезания зубчатых венцов с пространственными геометриями в пространственной постановке расширит технологические возможности существующего серийного оборудования и позволит полностью раскрыть потенциал зубообрабатывающего оборудования с ЧПУ.

В результате анализа погрешностей изготовления зубчатых венцов цилиндрических колес и способов контроля их точности было установлено, что универсальные средства измерения не позволяют осуществлять контроль параметров точности зубьев с пространственными геометриями. Поэтому возникает необходимость в разработке новых методов контроля, что обусловлено сложностью геометрии контролируемых поверхностей, необходимостью обеспечить высокие показатели производительности, точности и степени автоматизации процесса, как самих измерений, так и последующей обработки данных.

Второй раздел «Теоретические основы ФОКТП повышения надежности, долговечности и нагрузочной способности цилиндрических зубчатых передач».

В работе разработан ФОКТП (рисунок 1) повышения надежности, долговечности и нагрузочной способности цилиндрических зубчатых передач, в соот-

ветствии с которым осуществляется как сквозное, так и итерационное проектирование цилиндрических колес с пространственной геометрией боковой поверхности зубьев, компенсирующих комплекс погрешностей и деформаций элементов передач.

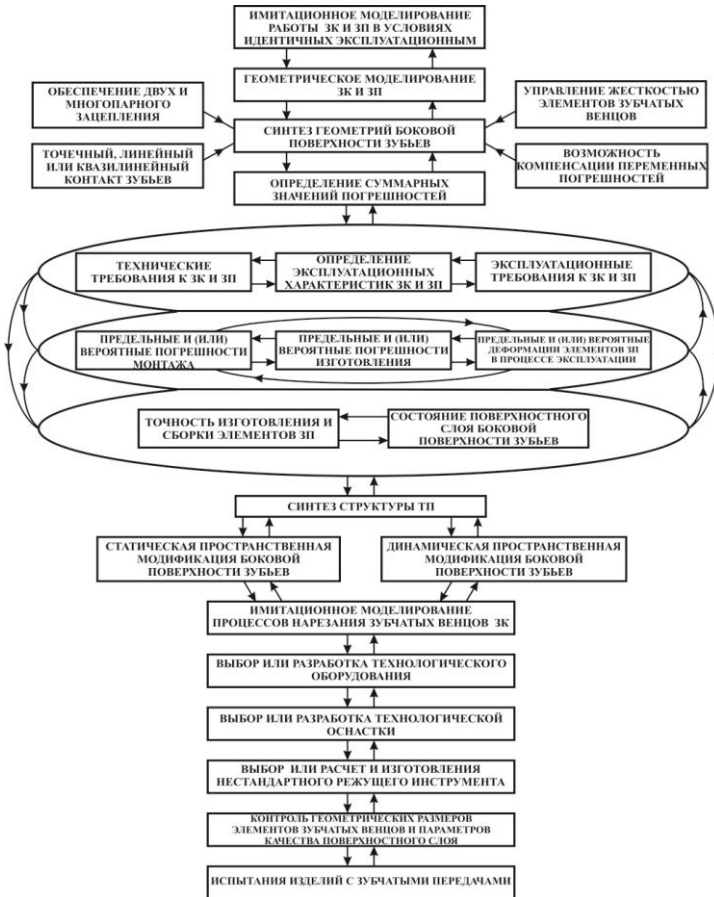


Рисунок 1. Структура ФОКТП

при наличии погрешностей и деформаций элементов передач (рисунки 2 и 3). Оси системы координат колеса (зубчатой обоймы) $S_2(x_2, y_2, z_2)$ параллельны осям абсолютной системы координат $S(X, Y, Z)$, а начало координат лежит на оси OY , а все возможные погрешности, деформации и перемещения сведены к суммарным значением перемещений и поворотов и приданы подвижной системе координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$, связанной с шестерней (зубчатой втулкой).

Системе координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$, сообщается (рисунок 2): поворот относительно оси x_1 на угол φ_{x2} ; поворот относительно оси y_1 на угол φ_{y2} ; три перемещения относительно трех координатных осей абсолютной системы координат Δx_2 ,

Для реализации ФОКТП выполнено обобщенное описание пространственно-го соединения цилиндрических колес при наличии погрешностей и деформаций элементов зубчатой передачи для условий внешнего и внутреннего зацеплений. Профиль зубьев колес и обойм зубчатых муфт принимается эвольвентным с прямолинейной образующей. Зубья шестерни и зубчатой втулки выполняются с пространственной геометрией боковой поверхности.

Зубья колес во время эксплуатации взаимодействуют при нали-

Δy_{Σ} , Δz_{Σ} ; во время работы шестерня (зубчатая втулка) вращается вокруг оси z_I^{III} , угол поворота φ_I ; начало координат системы переносится в полюс зацепления.

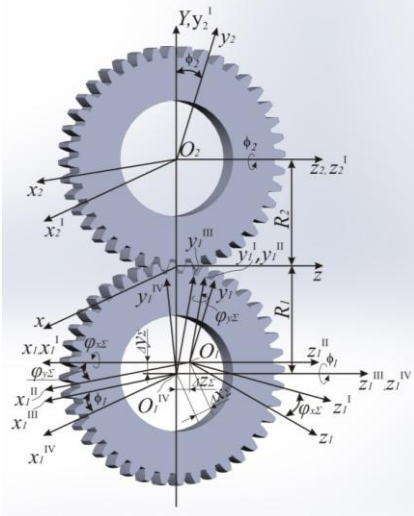
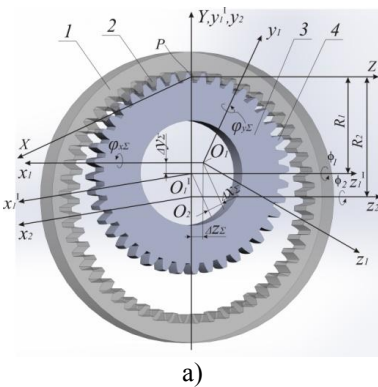


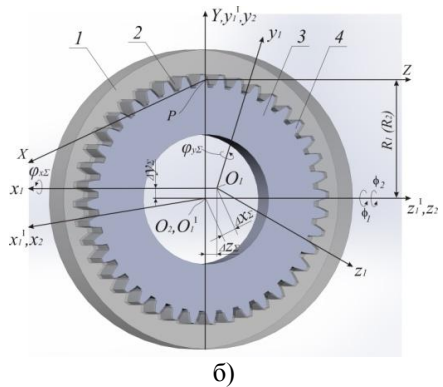
Рисунок 2. Системы координат цилиндрических колес внешнего зацепления

систем координат $S(X, Y, Z)$ к системе координат $S_I(x_I, y_I, z_I)$, зависящие от величин углов поворота $\varphi_{x\Sigma}$, $\varphi_{y\Sigma}$ и перемещений Δx_{Σ} , Δy_{Σ} , Δz_{Σ} .

Системе координат $S_2(x_2, y_2, z_2)$ сообщается (рисунок 2): поворот вокруг оси z_2 , угол поворота φ_2 ; начало координат системы переносится в полюс зацепления.



а)



б)

Рисунок 3. Системы координат цилиндрических колес внутреннего зацепления: а - передаточное отношение больше 1; б - передаточное отношение 1

Переход между системами координат $S_2(x_2, y_2, z_2)$ и $S(X, Y, Z)$ задается системой уравнений:

Переход между системами координат $S_I(x_I, y_I, z_I)$ и $S(X, Y, Z)$ задается системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} X &= m_{11}x_I + m_{12}y_I + m_{13}z_I + m_{14}; \\ Y &= m_{21}x_I + m_{22}y_I + m_{23}z_I + m_{24}; \\ Z &= m_{31}x_I + m_{32}y_I + m_{33}z_I + m_{34}; \end{aligned} \right\} (1)$$

где m_{ij} - коэффициенты в определителе матрицы перехода от системы координат $S_I(x_I, y_I, z_I)$ к системе координат $S(X, Y, Z)$, зависящие от величин углов поворота $\varphi_{x\Sigma}$, $\varphi_{y\Sigma}$ и перемещений Δx_{Σ} , Δy_{Σ} , Δz_{Σ} .

Переход между системами координат $S(X, Y, Z)$ и $S_I(x_I, y_I, z_I)$ задается системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x_I &= m'_{11}X + m'_{12}Y + m'_{13}Z + m'_{14}; \\ y_I &= m'_{21}X + m'_{22}Y + m'_{23}Z + m'_{24}; \\ z_I &= m'_{31}X + m'_{32}Y + m'_{33}Z + m'_{34}. \end{aligned} \right\} (2)$$

где m'_{ij} - коэффициенты в определителе матрицы перехода от системы координат

систем координат $S(X, Y, Z)$ к системе координат $S_I(x_I, y_I, z_I)$, зависящие от величин углов поворота $\varphi_{x\Sigma}$, $\varphi_{y\Sigma}$ и перемещений Δx_{Σ} , Δy_{Σ} , Δz_{Σ} .

Системе координат $S_2(x_2, y_2, z_2)$ сообщается (рисунок 2): поворот вокруг оси z_2 , угол поворота φ_2 ; начало координат системы переносится в полюс зацепления.

$$\left. \begin{aligned} X &= x_2 \cos \phi_2 + y_2 \sin \phi_2; \\ Y &= -x_2 \sin \phi_2 + y_2 \cos \phi_2 \pm R_2; \\ Z &= z_2, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где R_2 - радиус делительной окружности колеса (зубчатой обоймы).

Переход между системами координат $S(X, Y, Z)$ и $S_2(x_2, y_2, z_2)$ задается системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= X \cos \phi_2 - Y \sin \phi_2 \pm R_2 \sin \phi_2; \\ y_2 &= X \sin \phi_2 + Y \cos \phi_2 \mp R_2 \cos \phi_2; \\ z_2 &= Z. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Обобщенные уравнения геометрии боковой поверхности зуба шестерни (зубчатой втулки) получены при рассмотрении находящихся в соединении зубчатых колес в системе координат $S_I(x_I, y_I, z_I)$:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= (m'_{11} \cos \phi_2 - m'_{12} \sin \phi_2)x_2 + (m'_{11} \sin \phi_2 + m'_{12} \cos \phi_2)y_2 + m'_{13}z_2 \pm \\ &\pm R_2 m'_{12} + m'_{14}; \\ y_1 &= (m'_{21} \cos \phi_2 - m'_{22} \sin \phi_2)x_2 + (m'_{21} \sin \phi_2 + m'_{22} \cos \phi_2)y_2 + m'_{23}z_2 \pm \\ &\pm R_2 m'_{22} + m'_{24}; \\ z_1 &= (m'_{31} \cos \phi_2 - m'_{32} \sin \phi_2)x_2 + (m'_{31} \sin \phi_2 + m'_{32} \cos \phi_2)y_2 + m'_{33}z_2 \pm \\ &\pm R_2 m'_{32} + m'_{34}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Используя кинематический метод и его расширение для пространственного соединения цилиндрических колес, получены обобщенные зависимости, описывающие геометрию боковой поверхности зубьев:

- внешнего зацепления

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= r_{b2} A x_1 (\sin(\varphi_2 + \phi_{c_2P} - \phi_1 + \phi_2) - \varphi_2 \cos(\varphi_2 + \phi_{c_2P} - \phi_1 + \phi_2)) - \\ &- A x_2 \sin \phi_1 + A x_3 z_2 + A x_0; \\ y_1 &= r_{b2} [(A y_1 + A y_2 \varphi_2) \cos(\varphi_2 + \phi_{c_2P} - \phi_1 + \phi_2) + (A y_1 \varphi_2 - A y_2) \sin(\varphi_2 + \phi_{c_2P} - \phi_1 + \phi_2)] + \\ &+ A y_3 \cos \phi_1 + A y_4 \sin \phi_1 - A y_5 z_2 + A y_0; \\ z_1 &= r_{b2} [(A z_1 - A z_2 \varphi_2) \cos(\varphi_2 + \phi_{c_2P} - \phi_1 + \phi_2) + (A z_1 \varphi_2 + A z_2) \sin(\varphi_2 + \phi_{c_2P} - \phi_1 + \phi_2)] + \\ &+ A z_3 (\cos \phi_1 - \sin \phi_1) + A z_4 z_2 + A z_0; \\ y_1 &= R_1 + t g \alpha \cdot x_1; \\ \cos \alpha + \cos(\varphi_2 + \phi_{c_2P} + \phi_2) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

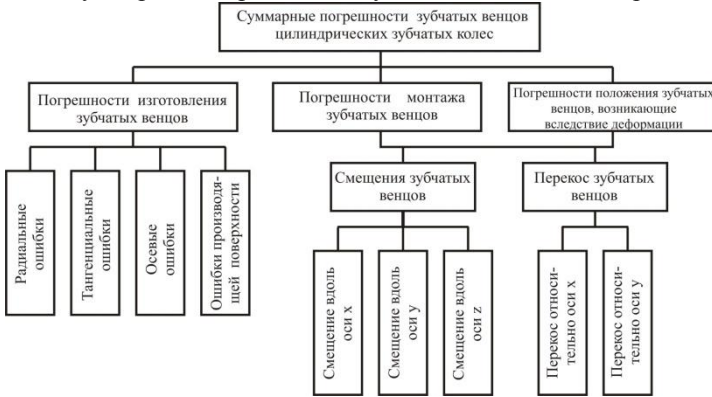
- внутреннего зацепления

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= r_{b2} A x_1 (\sin(\varphi_2 + \phi_{c_2P} - \phi_1 + \phi_2) - \varphi_2 \cos(\varphi_2 + \phi_{c_2P} - \phi_1 + \phi_2)) - \\ &- A x_2 \sin \phi_1 + A x_3 z_2 + A x_0; \\ y_1 &= r_{b2} [(A y_1 + A y_2 \varphi_2) \cos(\varphi_2 + \phi_{c_2P} - \phi_1 + \phi_2) + (A y_1 \varphi_2 - A y_2) \sin(\varphi_2 + \phi_{c_2P} - \phi_1 + \phi_2)] + \\ &+ A y_3 \cos \phi_1 + A y_4 \sin \phi_1 - A y_5 z_2 + A y_0; \\ z_1 &= r_{b2} [(A z_1 - A z_2 \varphi_2) \cos(\varphi_2 + \phi_{c_2P} - \phi_1 + \phi_2) + (A z_1 \varphi_2 + A z_2) \sin(\varphi_2 + \phi_{c_2P} - \phi_1 + \phi_2)] + \\ &+ A z_3 (\cos \phi_1 - \sin \phi_1) + A z_4 z_2 + A z_0; \\ y_1 &= R_1 + t g \alpha \cdot x_1; \\ \cos \alpha - \cos(\varphi_2 + \phi_{c_2P} + \phi_2) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где r_{b2} - радиус основной окружности колеса (зубчатой обоймы); φ_2 - угол развернутости эвольвентного профиля колеса (зубчатой обоймы); ϕ_{c_2P} - угол смещения

начала эвольвенты колеса (зубчатой обоймы), чтобы эвольвента проходила через полюс зацепления.

На основании классификации (рисунок 4) получены зависимости для определения суммарных погрешностей зубчатых венцов цилиндрических зубчатых колес.



В результате разработана методология синтеза зубьев колес внешнего и внутреннего зацеплений с пространственной геометрией боковой поверхности, способной компенсировать погрешности изготовления, монтажа и пере-

Рисунок 4. Классификация суммарных погрешностей цилиндрических передач

мещения, вызванные деформациями в процессе эксплуатации (рисунок 5).

Боковая поверхность пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес аппроксимируется сеткой сплайнов Безье третьего порядка, расположенных в двух направлениях - по длине и по высоте зуба. Параметры сплайнов Безье $\lambda_0 - \lambda_3$ и координаты узловых точек x_i и y_i , при описании боковой поверхности зуба по высоте, определяются системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x_{n-k} &= x_{n-k} \cdot (1 - \lambda_0)^3 + 3x_1 \cdot \lambda_0 \cdot (1 - \lambda_0)^2 + 3x_2 \cdot \lambda_0^2 \cdot (1 - \lambda_0) + x_{k-k} \cdot \lambda_0^3; \\ y_{n-k} &= y_{n-k} \cdot (1 - \lambda_0)^3 + 3y_1 \cdot \lambda_0 \cdot (1 - \lambda_0)^2 + 3y_2 \cdot \lambda_0^2 \cdot (1 - \lambda_0) + y_{k-k} \cdot \lambda_0^3; \\ x_{p1} &= x_{n-k} \cdot (1 - \lambda_1)^3 + 3x_1 \cdot \lambda_1 \cdot (1 - \lambda_1)^2 + 3x_2 \cdot \lambda_1^2 \cdot (1 - \lambda_1) + x_{k-k} \cdot \lambda_1^3; \\ y_{p1} &= y_{n-k} \cdot (1 - \lambda_1)^3 + 3y_1 \cdot \lambda_1 \cdot (1 - \lambda_1)^2 + 3y_2 \cdot \lambda_1^2 \cdot (1 - \lambda_1) + y_{k-k} \cdot \lambda_1^3; \\ x_{p2} &= x_{n-k} \cdot (1 - \lambda_2)^3 + 3x_1 \cdot \lambda_2 \cdot (1 - \lambda_2)^2 + 3x_2 \cdot \lambda_2^2 \cdot (1 - \lambda_2) + x_{k-k} \cdot \lambda_2^3; \\ y_{p2} &= y_{n-k} \cdot (1 - \lambda_2)^3 + 3y_1 \cdot \lambda_2 \cdot (1 - \lambda_2)^2 + 3y_2 \cdot \lambda_2^2 \cdot (1 - \lambda_2) + y_{k-k} \cdot \lambda_2^3; \\ x_{k-k} &= x_{n-k} \cdot (1 - \lambda_3)^3 + 3x_1 \cdot \lambda_3 \cdot (1 - \lambda_3)^2 + 3x_2 \cdot \lambda_3^2 \cdot (1 - \lambda_3) + x_{k-k} \cdot \lambda_3^3; \\ y_{k-k} &= y_{n-k} \cdot (1 - \lambda_3)^3 + 3y_1 \cdot \lambda_3 \cdot (1 - \lambda_3)^2 + 3y_2 \cdot \lambda_3^2 \cdot (1 - \lambda_3) + y_{k-k} \cdot \lambda_3^3; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где x_{n-k} , x_i , x_{k-k} , y_{n-k} , y_i , y_{k-k} - координаты точек, принадлежащих профилю зуба шестерни (зубчатой втулки).

Аналогично выполняется аппроксимация геометрии боковой поверхности зубьев шестерни с пространственной геометрией семейством сплайнов Безье третьего порядка по длине зуба.

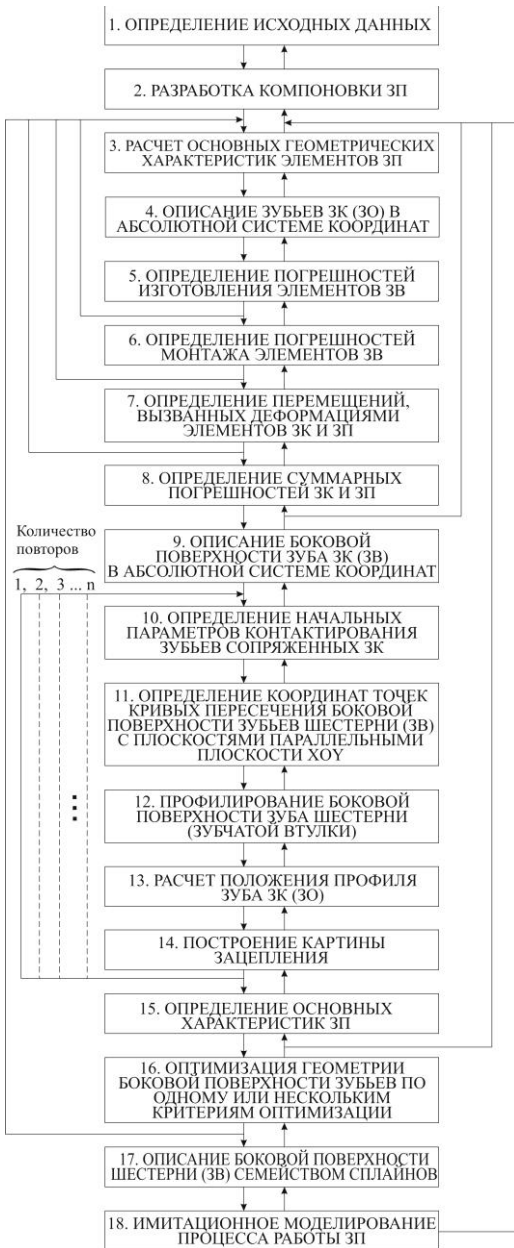


Рисунок 5. Методология синтеза зубчатых колес с пространственной геометрией боковой поверхности

Третий раздел «Теоретические основы многокоординатного зубофрезерования цилиндрических колес с пространственной геометрией зубьев методом копирования».

Разработаны способы многокоординатного зубофрезерования пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес методом копирования пальцевыми и дисковыми модульными фрезами (рисунок 6), позволяющие повысить геометрическую точность нарезаемых зубьев. В процессе формообразования заготовка зубчатого колеса неподвижна. РИ перемещается вдоль пространственной траектории относительного перемещения $a-a$, при этом непрерывно изменяется положение профилирующей плоскости относительно осей неподвижной системы координат $x_1y_1z_1$. Для изменения положения профилирующей плоскости системы координат $x_0y_0z_0$ пальцевой и $x_0'O_0'y_0'$ дисковой модульных фрез непрерывно поворачиваются относительно осей O_1x_1 и O_1y_1 неподвижной системы координат $x_1y_1z_1$. Повышение геометрической точности нарезаемых зубьев происходит за счет обеспечения такого положения профилирующей плоскости, которое минимизирует отклонения профиля нарезаемых зубьев.

Обработка предложенным способом выполняется за два прохода. Боковая поверх-

ность зубьев формируется по частям, при этом за один рабочий ход обрабатываются противоположные части левой и правой боковых поверхностей зубьев. Для обработки следующей впадины зубьев инструмент выводится из контакта с заготовкой, заготовка делится на один угловой шаг, после чего обрабатывается следующая впадина зуба и так пока не будут обработаны все зубья. Обработка может осуществляться как стандартным РИ, так и специально профилированным РИ на станках с ЧПУ.

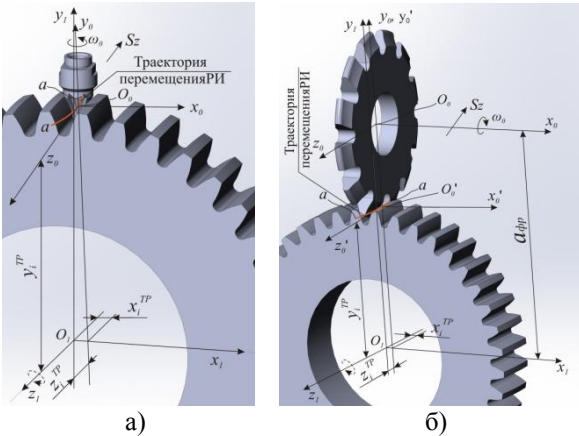


Рисунок 6. Многокоординатное зубофрезерование пространственно-модифицированных зубьев методом копирования: а - пальцевой; б - дисковой модульными фрезами

$$\left. \begin{aligned} x_1(\lambda) &= x_{n-k} \cdot (1-\lambda)^3 + 3 \cdot x_1 \cdot \lambda \cdot (1-\lambda)^2 + 3 \cdot x_2 \cdot \lambda^2 \cdot (1-\lambda) + x_{n-k} \cdot \lambda^3, \\ z_1(\lambda) &= z_{n-k} \cdot (1-\lambda)^3 + 3 \cdot z_1 \cdot \lambda \cdot (1-\lambda)^2 + 3 \cdot z_2 \cdot \lambda^2 \cdot (1-\lambda) + z_{n-k} \cdot \lambda^3, \\ A_{pi} \cdot x_1(\lambda) + B_{pi} \cdot y_{1kor} + C_{pi} \cdot z_1(\lambda) + D_{pi} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Параметры перехода между системами координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$ и $S_0(x_0, y_0, z_0)$ определяются решением системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 1 &= \cos \alpha_y x_{11} - \sin \alpha_x \sin \alpha_y y_{11} - \cos \alpha_x \sin \alpha_y z_{11} + z_{cpi} \sin \alpha_y \cos \alpha_x - x_{cpi} \cos \alpha_y + y_{cpi} \sin \alpha_x \sin \alpha_y; \\ 0 &= \cos \alpha_x y_{11} - \sin \alpha_x z_{11} + z_{cpi} \sin \alpha_x - y_{cpi} \cos \alpha_x; \\ 0 &= \sin \alpha_y x_{11} + \cos \alpha_y \sin \alpha_x y_{11} + \cos \alpha_x \cos \alpha_y z_{11} - x_{cpi} \sin \alpha_y - y_{cpi} \cos \alpha_y \sin \alpha_x - z_{cpi} \cos \alpha_x \cos \alpha_y; \\ A_{pi} \cdot x_{11} + B_{pi} \cdot y_{11} + C_{pi} \cdot z_{11} + D_{pi} &= 0 \\ 0 &= \cos \alpha_y x_{12} - \sin \alpha_x \sin \alpha_y y_{12} - \cos \alpha_x \sin \alpha_y z_{12} + z_{cpi} \sin \alpha_y \cos \alpha_x - x_{cpi} \cos \alpha_y + y_{cpi} \sin \alpha_x \sin \alpha_y; \\ 1 &= \cos \alpha_x y_{12} - \sin \alpha_x z_{12} + z_{cpi} \sin \alpha_x - y_{cpi} \cos \alpha_x; \\ 0 &= \sin \alpha_y x_{12} + \cos \alpha_y \sin \alpha_x y_{12} + \cos \alpha_x \cos \alpha_y z_{12} - x_{cpi} \sin \alpha_y - y_{cpi} \cos \alpha_y \sin \alpha_x - z_{cpi} \cos \alpha_x \cos \alpha_y; \\ A_{pi} \cdot x_{12} + B_{pi} \cdot y_{12} + C_{pi} \cdot z_{12} + D_{pi} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где x_{11}, y_{11}, z_{11} и x_{12}, y_{12}, z_{12} - координаты точек, принадлежащих осям системы координат $S_0(x_0, y_0, z_0)$ в системе координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$; α_x и α_y - параметры пере-

Разработана методика аналитического определения параметров пространственной траектории относительного перемещения РИ, работающего по методу копирования, при обработке зубчатых венцов с пространственной геометрией боковой поверхности зубьев (рисунок 7).

Координаты точек пересечения профилирующей плоскости с боковой поверхностью зуба, описанной сплайнами, при заданных значениях координаты по высоте зуба y_{1kor} определяются системой уравнений:

хода от системы координат шестерни $x_I y_I z_I$ к системе координат РИ $x_0 y_0 z_0$ или $x_0' y_0' z_0'$.

Геометрия режущей кромки специально спрофилированного РИ описывается системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x_{0i}^{sp} &= (1 - \lambda_{ui})^3 x_{00}^{sp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{ui})^2 \lambda_{ui} x_{ui1} + 3 \cdot (1 - \lambda_{ui}) \lambda_{ui}^2 x_{ui2} + \lambda_{ui}^3 x_{0n}^{sp}; \\ y_{0i}^{sp} &= (1 - \lambda_{ui})^3 y_{00}^{sp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{ui})^2 \lambda_{ui} y_{ui1} + 3 \cdot (1 - \lambda_{ui}) \lambda_{ui}^2 y_{ui2} + \lambda_{ui}^3 y_{0n}^{sp}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где x_{0i}^{sp} , y_{0i}^{sp} - координаты i -й точки режущей кромки; x_{ui} , y_{ui} - координаты i -й опорной точки сплайна; λ_{ui} - i -й параметр сплайна.

Координаты точек на режущей кромки стандартного РИ определяются по зависимостям:

- для левого профиля зуба:

$$\left. \begin{aligned} x_{0l} &= r_{b1} [\sin(\varphi) - \varphi_1 \cos(\varphi)] \\ y_{0l} &= r_{b1} [\cos(\varphi) + \varphi_1 \sin(\varphi)] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

- для правого профиля зуба:

$$\left. \begin{aligned} x_{0p} &= -r_{b1} [\sin(\varphi) - \varphi_1 \cos(\varphi)] \\ y_{0p} &= r_{b1} [\cos(\varphi) + \varphi_1 \sin(\varphi)] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где r_{b1} - радиус основной окружности шестерни; z_1 - количество зубьев шестерни; φ - угол, определяемый по зависимости:

$$\varphi = \frac{\pi}{z_1} + \varphi_1 - \phi_{c-1}$$

φ_1 - угол развернутости эвольвентного профиля шестерни; ϕ_{c-1} - угол смещения начала эвольвенты шестерни:

$$\phi_{c-1} = \frac{\pi}{2 \cdot z_1} + inv\alpha.$$

Координаты точек пространственной траектории относительного перемещения РИ x_i^{mp} , y_i^{mp} , z_i^{mp} с учетом значений радиальной и тангенциальной коррекций

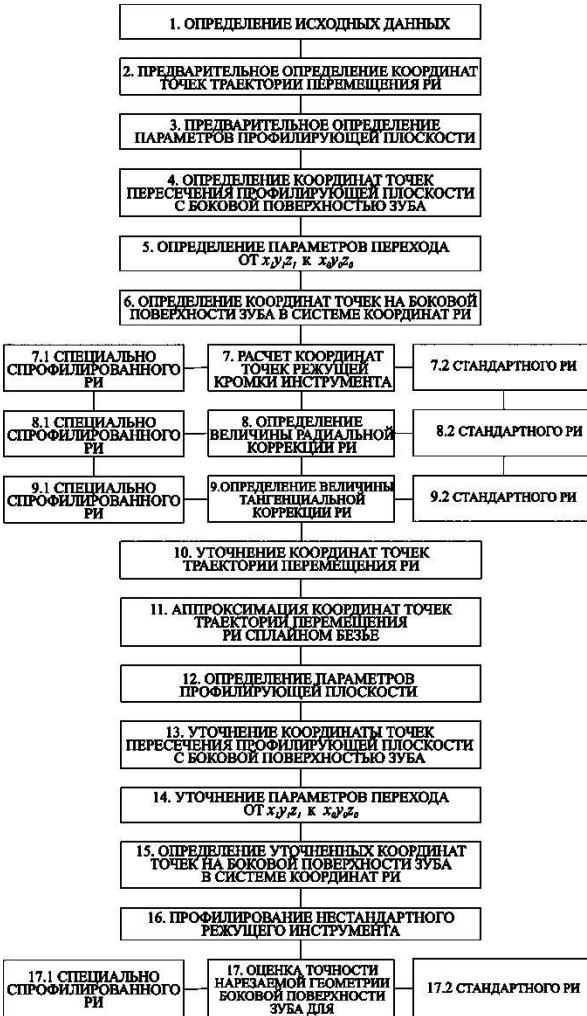


Рисунок 7 - Методика определения параметров траектории относительного перемещения РИ, работающего по методу копирования

определяются системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x_i^{mp} &= x_{mpi}^{np} - k_{ii}; \\ y_i^{mp} &= y_{mpi}^{np} + k_{ri}; \\ z_i^{mp} &= z_{mpi}^{np}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где x_{mpi}^{np} , y_{mpi}^{np} , z_{mpi}^{np} - предварительно определенные значения координат точек пространственной траектории относительного перемещения РИ; k_{ii} и k_{ri} - значения тангенциальной и радиальной коррекции РИ.

Координаты точек пространственной траектории относительного перемещения РИ аппроксимируются сплайном Безье третьего порядка:

$$\left. \begin{aligned} x_i^{mp} &= (1 - \lambda_i^{mp})^3 x_0^{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp})^2 \lambda_i^{mp} x1_{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp}) \lambda_i^{mp^2} x2_{mp} + \lambda_i^{mp^3} x_n^{mp}; \\ y_i^{mp} &= (1 - \lambda_i^{mp})^3 y_0^{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp})^2 \lambda_i^{mp} y1_{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp}) \lambda_i^{mp^2} y2_{mp} + \lambda_i^{mp^3} y_n^{mp}; \\ z_i^{mp} &= (1 - \lambda_i^{mp})^3 z_0^{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp})^2 \lambda_i^{mp} z1_{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp}) \lambda_i^{mp^2} z2_{mp} + \lambda_i^{mp^3} z_n^{mp}, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

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 относительного перемещения РИ; $x1_{mp}$, $y1_{mp}$, $z1_{mp}$ и $x2_{mp}$, $y2_{mp}$, $z2_{mp}$ - координаты опорных точек сплайна; λ_i^{mp} - i параметр сплайна.

Приведенные зависимости позволяют определять координаты узловых точек траектории относительного перемещения РИ в процессе многокоординатной обработки пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес на станках с ЧПУ. Отклонения координат по толщине зуба при перемещении РИ по пространственной траектории для специально спрофилированного РИ не превышает 3%, а при обработке стандартным РИ – 5%.

Стабильность процесса формообразования и, как следствие, качество обработанной поверхности зависят от ряда факторов, одним из которых является параметры срезаемого РИ слоя. Параметры срезаемого слоя зависят от режимов резания, геометрии режущей кромки инструмента, расположения оси вращения РИ относительно заготовки и траектории его относительного перемещения.

Количество резов необходимое для обработки половины зубчатого венца от его плоскости симметрии до выхода РИ на торец:

$$k_{рез} = \frac{b_{w1}}{2 \cdot S_z}. \quad (16)$$

Распределение координат по длине зуба шестерни:

$$z_{Szi}^{mp} = \frac{b_{w1} \cdot i}{2 \cdot k_{рез}}, \quad (17)$$

где i - номер точки траектории относительного перемещения инструмента, $i=0 \dots k_{рез}$.

Параметр сплайна λ_i^{mp} для рассматриваемой точки траектории определяется решением уравнения:

$$z_{Szi}^{mp} = (1 - \lambda_i^{mp})^3 z_0^{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp})^2 \lambda_i^{mp} z1_{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_i^{mp}) \lambda_i^{mp^2} z2_{mp} + \lambda_i^{mp^3} z_n^{mp}. \quad (18)$$

Оставшиеся координаты точек траектории перемещения РИ x_{Szi}^{mp} и y_{Szi}^{mp} , соответствующие перемещению РИ на значение подачи на зуб s_z определяются подстановкой параметра сплайна λ_i^{mp} в первое и второе уравнения системы (15).

Толщина слоя срезаемого зубом фрезы определяется по нормали между двумя соседними поверхностями реза, описываемыми в пространстве вращающимися режущими кромками:

$$a = \sqrt{(x_{1,i+1}^u - x_{1,i}^u)^2 + (y_{1,i+1}^u - y_{1,i}^u)^2 + (z_{1,i+1}^u - z_{1,i}^u)^2}, \quad (19)$$

где $x_{1,i}^u$, $y_{1,i}^u$, $z_{1,i}^u$ - координаты рассматриваемой точки режущей кромки;

$x_{1,i+1}^u$, $y_{1,i+1}^u$, $z_{1,i+1}^u$ - координаты точки пересечения нормали из рассматриваемой точки поверхности резания, к предыдущему положению поверхности резания.

Координаты точек, принадлежащих режущей кромке пальцевой модульной фрезы, в подвижной системе координат определяются системами уравнений:

- для левой режущей кромки инструмента

$$\left. \begin{aligned} x_{1,i}^u &= -r_{b1} [\sin \varphi_i - \varphi_{li} \cos \varphi_i] \{ \cos \varphi_{uj} \cos \alpha_{yi} - \sin \varphi_{uj} \sin \alpha_{yi} \} + x_{Szi}^{mp}; \\ y_{1,i}^u &= r_{b1} [\sin \varphi_i - \varphi_{li} \cos \varphi_i] \{ \cos \varphi_{uj} \sin \alpha_{xi} \sin \alpha_{yi} + \sin \varphi_{uj} \cos \alpha_{xi} \sin \alpha_{yi} \} + \\ &+ r_{b1} [\cos \varphi_i + \varphi_{li} \sin \varphi_i] \{ \cos \alpha_{xi} + y_{Szi}^{mp} - R_1 \}; \\ z_{1,i}^u &= r_{b1} [\sin \varphi_i - \varphi_{li} \cos \varphi_i] \{ \cos \varphi_{uj} \cos \alpha_{xi} \sin \alpha_{yi} + \sin \varphi_{uj} \cos \alpha_{xi} \cos \alpha_{yi} \} - \\ &- r_{b1} [\cos \varphi_i + \varphi_{li} \sin \varphi_i] \{ \sin \alpha_{xi} + z_{Szi}^{mp} \}. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

- для правой режущей кромки инструмента

$$\left. \begin{aligned} x_{1,i}^u &= r_{b1} [\sin \varphi_i - \varphi_{li} \cos \varphi_i] \{ \cos \varphi_{uj} \cos \alpha_{yi} - \sin \varphi_{uj} \sin \alpha_{yi} \} + x_{Szi}^{mp}; \\ y_{1,i}^u &= -r_{b1} [\sin \varphi_i - \varphi_{li} \cos \varphi_i] \{ \cos \varphi_{uj} \sin \alpha_{xi} \sin \alpha_{yi} + \sin \varphi_{uj} \cos \alpha_{xi} \sin \alpha_{yi} \} + \\ &+ r_{b1} [\cos \varphi_i + \varphi_{li} \sin \varphi_i] \{ \cos \alpha_{xi} + y_{Szi}^{mp} - R_1 \}; \\ z_{1,i}^u &= -r_{b1} [\sin \varphi_i - \varphi_{li} \cos \varphi_i] \{ \cos \varphi_{uj} \cos \alpha_{xi} \sin \alpha_{yi} + \sin \varphi_{uj} \cos \alpha_{xi} \cos \alpha_{yi} \} - \\ &- r_{b1} [\cos \varphi_i + \varphi_{li} \sin \varphi_i] \{ \sin \alpha_{xi} + z_{Szi}^{mp} \}. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Составив уравнение нормали, проходящей через рассматриваемую точку поверхности реза, взяв частные производные зависимостей, определяющих координаты поверхности резания по углу развернутости эвольвенты и по углу поворота пальцевой модульной фрезы, раскрыв определители, получим зависимости для определения постоянных коэффициентов в уравнении нормали:

$$A_{N\bar{i}} = -r_{b1}^2 \cdot \varphi_{li} (\sin \varphi_i - \varphi_{li} \cos \varphi_i) \{ \cos \alpha_y \sin \alpha_x \cos \varphi_i \sin \varphi_{uj} - \cos \alpha_x \sin \varphi_i + \sin \alpha_x \sin \alpha_y \cos \varphi_i \cos \varphi_{uj} \}; \quad (22)$$

$$B_{N\bar{i}} = r_{b1}^2 \cdot \varphi_{li} \cos(\varphi_{uj} + \alpha_y) \{ \cos \varphi_i \cdot \sin \varphi_i - \varphi_{li} (\cos \varphi_i)^2 \}; \quad (23)$$

$$\begin{aligned} C_{N\bar{i}} &= -r_{b1}^2 \cdot \varphi_{li} \cdot \sin(\varphi_{uj} + \alpha_y) \{ \sin \varphi_i - \varphi_{li} \cos \varphi_i \} \{ \cos \alpha_x \cdot \cos \varphi_i + \cos \alpha_y \cdot \sin \alpha_x \sin \varphi_i \sin \varphi_{uj} + \\ &+ \sin \alpha_x \sin \alpha_y \sin \varphi_i \cos \varphi_{uj} - 0,5 \cdot r_{b1} \cdot \cos(\varphi_{uj} + \alpha_y) \sin \varphi_i (\sin(\varphi_{uj} - \alpha_x + \alpha_y) - \sin(\varphi_{uj} + \alpha_x + \alpha_y)) \} \times \\ &\times (\varphi_{li} \cos \varphi_i - \sin \varphi_i). \end{aligned} \quad (24)$$

Координаты пересечения нормали с поверхностью текущего и последующего резов определяются решением системы уравнений относительно координат $x_{1,j}^u$, $y_{1,j}^u$, $z_{1,j}^u$ и углов φ_{uj} и φ_{li} :

$$\left. \begin{aligned} x_{1,j}^u &= -r_{b1} [\sin \varphi_i - \varphi_{li} \cos \varphi_i] (\cos \varphi_{uj0} \cos \alpha_{yi} - \sin \varphi_{uj0} \sin \alpha_{yi}) + x_{Szi}^{mp}; \\ y_{1,j}^u &= r_{b1} [\sin \varphi_i - \varphi_{li} \cos \varphi_i] (\cos \varphi_{uj0} \sin \alpha_{xi} \sin \alpha_{yi} + \sin \varphi_{uj0} \cos \alpha_{xi} \sin \alpha_{yi}) + \\ &+ r_{b1} [\cos \varphi_i + \varphi_{li} \sin \varphi_i] \cos \alpha_{xi} + y_{Szi}^{mp} - R_1; \\ z_{1,j}^u &= r_{b1} [\sin \varphi_i - \varphi_{li} \cos \varphi_i] (\cos \varphi_{uj0} \cos \alpha_{xi} \sin \alpha_{yi} + \sin \varphi_{uj0} \cos \alpha_{xi} \cos \alpha_{yi}) - \\ &- r_{b1} [\cos \varphi_i + \varphi_{li} \sin \varphi_i] \sin \alpha_{xi} + z_{Szi}^{mp}; \\ (x_{1,j}^u - x_{1,i+1,j}^u) A_{N\bar{i}+1} &= (y_{1,j}^u - y_{1,i+1,j}^u) B_{N\bar{i}+1}; \\ (x_{1,j}^u - x_{1,i+1,j}^u) C_{N\bar{i}+1} &= (z_{1,j}^u - z_{1,i+1,j}^u) B_{N\bar{i}+1}. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Параметры сечения среза при переменной подаче на зуб пальцевой модульной фрезы определяется решением системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x_{1,j}^u &= -r_{b1} [\sin \varphi_i - \varphi_{li} \cos \varphi_i] (\cos \varphi_{uj0} \cos \alpha_{yi} - \sin \varphi_{uj0} \sin \alpha_{yi}) + x_{Szi}^{mp}; \\ y_{1,j}^u &= r_{b1} [\sin \varphi_i - \varphi_{li} \cos \varphi_i] (\cos \varphi_{uj0} \sin \alpha_{xi} \sin \alpha_{yi} + \sin \varphi_{uj0} \cos \alpha_{xi} \sin \alpha_{yi}) + \\ &+ r_{b1} [\cos \varphi_i + \varphi_{li} \sin \varphi_i] \cos \alpha_{xi} + y_{Szi}^{mp} - R_1; \\ z_{1,j}^u &= r_{b1} [\sin \varphi_i - \varphi_{li} \cos \varphi_i] (\cos \varphi_{uj0} \cos \alpha_{xi} \sin \alpha_{yi} + \sin \varphi_{uj0} \cos \alpha_{xi} \cos \alpha_{yi}) - \\ &- r_{b1} [\cos \varphi_i + \varphi_{li} \sin \varphi_i] \sin \alpha_{xi} + z_{Szi}^{mp}; \\ x_{1,i+1,j}^u &= -r_{b1} [\sin \varphi_{i+1} - \varphi_{li+1} \cos \varphi_{i+1}] (\cos \varphi_{uj} \cos \alpha_{yi+1} - \sin \varphi_{uj} \sin \alpha_{yi+1}) + x_{Szi+1}^{mp}; \\ y_{1,i+1,j}^u &= r_{b1} [\sin \varphi_{i+1} - \varphi_{li+1} \cos \varphi_{i+1}] (\cos \varphi_{uj} \sin \alpha_{xi+1} \sin \alpha_{yi+1} + \sin \varphi_{uj} \cos \alpha_{xi+1} \sin \alpha_{yi+1}) + \\ &+ r_{b1} [\cos \varphi_{i+1} + \varphi_{li+1} \sin \varphi_{i+1}] \cos \alpha_{xi+1} + y_{Szi+1}^{mp} - R_1; \\ z_{1,i+1,j}^u &= r_{b1} [\sin \varphi_{i+1} - \varphi_{li+1} \cos \varphi_{i+1}] (\cos \varphi_{uj} \cos \alpha_{xi+1} \sin \alpha_{yi+1} + \sin \varphi_{uj} \cos \alpha_{xi+1} \cos \alpha_{yi+1}) - \\ &- r_{b1} [\cos \varphi_{i+1} + \varphi_{li+1} \sin \varphi_{i+1}] \sin \alpha_{xi+1} + z_{Szi+1}^{mp}; \\ x_{Szi+1}^{mp} &= (1 - \lambda_{i+1}^{mp})^3 x_0^{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{i+1}^{mp})^2 \lambda_{i+1}^{mp} x_{1mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{i+1}^{mp}) \lambda_{i+1}^{mp2} x_{2mp} + \lambda_{i+1}^{mp3} x_n^{mp}; \\ y_{Szi+1}^{mp} &= (1 - \lambda_{i+1}^{mp})^3 y_0^{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{i+1}^{mp})^2 \lambda_{i+1}^{mp} y_{1mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{i+1}^{mp}) \lambda_{i+1}^{mp2} y_{2mp} + \lambda_{i+1}^{mp3} y_n^{mp}; \\ z_{Szi+1}^{mp} &= (1 - \lambda_{i+1}^{mp})^3 z_0^{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{i+1}^{mp})^2 \lambda_{i+1}^{mp} z_{1mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{i+1}^{mp}) \lambda_{i+1}^{mp2} z_{2mp} + \lambda_{i+1}^{mp3} z_n^{mp}; \\ \alpha_{xi+1} &= \arctan(B_{pi+1}/C_{pi+1}); \\ \alpha_{yi+1} &= \arctan(A_{pi+1}/(B_{pi+1} \sin \alpha_{xi+1} + C_{pi+1} \cos \alpha_{xi+1})); \\ (x_{1,j}^u - x_{1,i+1,j}^u) A_{N\bar{i}+1} &= (y_{1,j}^u - y_{1,i+1,j}^u) B_{N\bar{i}+1}; \\ (x_{1,j}^u - x_{1,i+1,j}^u) C_{N\bar{i}+1} &= (z_{1,j}^u - z_{1,i+1,j}^u) B_{N\bar{i}+1}; \\ a &= \sqrt{(x_{1,i+1,j}^u - x_{1,j}^u)^2 + (y_{1,i+1,j}^u - y_{1,j}^u)^2 + (z_{1,i+1,j}^u - z_{1,j}^u)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Координаты точек, принадлежащих режущей кромке дисковой модульной фрезы, в подвижной системе координат определяются системами уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x_{1,j}^u &= X(\lambda_i) \cos \alpha_{yi} - Y(\lambda_i) \sin \alpha_{yi} \sin \varphi_{uj} + 0,5D_{\phi p} \sin \alpha_{yi} \sin \varphi_{uj} + x_{Szi}^{mp}; \\ y_{1,j}^u &= -X(\lambda_i) \sin \alpha_{xi} \sin \alpha_{yi} + Y(\lambda_i) (\cos \alpha_{xi} \cos \varphi_{uj} - \cos \alpha_{yi} \sin \alpha_{xi} \sin \varphi_{uj}) + \\ &+ 0,5D_{\phi p} (\cos \alpha_{yi} \sin \alpha_{xi} \sin \varphi_{uj} - \cos \alpha_{xi} \cos \varphi_{uj}) + a_{\phi p} \cos \alpha_{xi} + y_{Szi}^{mp} - R_1; \\ z_{1,j}^u &= -X(\lambda_i) \cos \alpha_{xi} \sin \alpha_{yi} - Y(\lambda_i) (\sin \alpha_{xi} \cos \varphi_{uj} + \cos \alpha_{xi} \cos \alpha_{yi} \sin \varphi_{uj}) + \\ &+ 0,5D_{\phi p} (\sin \alpha_{xi} \cos \varphi_{uj} + \cos \alpha_{xi} \cos \alpha_{yi} \sin \varphi_{uj}) + z_{Szi}^{mp} - a_{\phi p} \sin \alpha_{xi}. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

где - $D_{\phi p}$ - наружный диаметр дисковой модульной фрезы; $X(\lambda_i)$ и $Y(\lambda_i)$ - функции, описывающие геометрию режущей кромки дисковой модульной фрезы сплайнами Безье пятого порядка:

$$\left. \begin{aligned} X(\lambda) &= (1-\lambda)^5 X_{p0} + 5 \cdot (1-\lambda)^4 \lambda X_{p1} + 10 \cdot (1-\lambda)^3 \lambda^2 X_{p2} + 10 \cdot (1-\lambda)^2 \lambda^3 X_{p3} + 5 \cdot (1-\lambda) \lambda^4 X_{p4} + \lambda^5 X_{p5}; \\ Y(\lambda) &= (1-\lambda)^5 Y_{p0} + 5 \cdot (1-\lambda)^4 \lambda Y_{p1} + 10 \cdot (1-\lambda)^3 \lambda^2 Y_{p2} + 10 \cdot (1-\lambda)^2 \lambda^3 Y_{p3} + 5 \cdot (1-\lambda) \lambda^4 Y_{p4} + \lambda^5 Y_{p5}. \end{aligned} \right\} (28)$$

Неизвестные параметры сплайна $\lambda_0 - \lambda_7$ и координаты опорных точек $Xp_1 - Xp_4$, $Yp_1 - Yp_4$, определим, подставив в левую часть уравнений (28) вместо функций $X(\lambda_i)$ и $Y(\lambda_i)$ значения координат узловых точек участков профиля дисковой модульной фрезы, решением системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} X(\lambda_0) &= (1-\lambda_0)^5 X_{p0} + 5 \cdot (1-\lambda_0)^4 \lambda_0 X_{p1} + 10 \cdot (1-\lambda_0)^3 \lambda_0^2 X_{p2} + 10 \cdot (1-\lambda_0)^2 \lambda_0^3 X_{p3} + 5 \cdot (1-\lambda_0) \lambda_0^4 X_{p4} + \lambda_0^5 X_{p5}; \\ Y(\lambda_0) &= (1-\lambda_0)^5 Y_{p0} + 5 \cdot (1-\lambda_0)^4 \lambda_0 Y_{p1} + 10 \cdot (1-\lambda_0)^3 \lambda_0^2 Y_{p2} + 10 \cdot (1-\lambda_0)^2 \lambda_0^3 Y_{p3} + 5 \cdot (1-\lambda_0) \lambda_0^4 Y_{p4} + \lambda_0^5 Y_{p5}; \\ X(\lambda_1) &= (1-\lambda_1)^5 X_{p0} + 5 \cdot (1-\lambda_1)^4 \lambda_1 X_{p1} + 10 \cdot (1-\lambda_1)^3 \lambda_1^2 X_{p2} + 10 \cdot (1-\lambda_1)^2 \lambda_1^3 X_{p3} + 5 \cdot (1-\lambda_1) \lambda_1^4 X_{p4} + \lambda_1^5 X_{p5}; \\ Y(\lambda_1) &= (1-\lambda_1)^5 Y_{p0} + 5 \cdot (1-\lambda_1)^4 \lambda_1 Y_{p1} + 10 \cdot (1-\lambda_1)^3 \lambda_1^2 Y_{p2} + 10 \cdot (1-\lambda_1)^2 \lambda_1^3 Y_{p3} + 5 \cdot (1-\lambda_1) \lambda_1^4 Y_{p4} + \lambda_1^5 Y_{p5}; \\ \dots \dots \dots \\ X(\lambda_7) &= (1-\lambda_7)^5 X_{p0} + 5 \cdot (1-\lambda_7)^4 \lambda_7 X_{p1} + 10 \cdot (1-\lambda_7)^3 \lambda_7^2 X_{p2} + 10 \cdot (1-\lambda_7)^2 \lambda_7^3 X_{p3} + 5 \cdot (1-\lambda_7) \lambda_7^4 X_{p4} + \lambda_7^5 X_{p5}; \\ Y(\lambda_7) &= (1-\lambda_7)^5 Y_{p0} + 5 \cdot (1-\lambda_7)^4 \lambda_7 Y_{p1} + 10 \cdot (1-\lambda_7)^3 \lambda_7^2 Y_{p2} + 10 \cdot (1-\lambda_7)^2 \lambda_7^3 Y_{p3} + 5 \cdot (1-\lambda_7) \lambda_7^4 Y_{p4} + \lambda_7^5 Y_{p5}. \end{aligned} \right\} (29)$$

Составив уравнение нормали, проходящей через рассматриваемую точку поверхности реза, взяв частные производные зависимостей, определяющих координаты поверхности резания по параметру сплайна λ_i и по углу поворота режущего инструмента φ_{ij} , получим зависимости по определению постоянных коэффициентов в уравнении нормали.

Координаты пересечения нормали с поверхностью текущего и последующего резов определяются решением системы уравнений относительно $x_{1_{i+1,j}}^u$, $y_{1_{i+1,j}}^u$, $z_{1_{i+1,j}}^u$, угла $\varphi_{u\bar{i}+1}$ и параметра сплайна λ_{i+1} :

- при врезании и перемещении вдоль траектории:

$$\left. \begin{aligned} x_{1_{i+1,j}}^u &= X(\lambda_{i+1}) \cos \alpha_{\bar{y}i+1} - Y(\lambda_{i+1}) \sin \alpha_{\bar{y}i+1} \sin \varphi_{u\bar{i}+1} + 0,5D_{\phi p} \sin \alpha_{\bar{y}i+1} \sin \varphi_{u\bar{i}+1} + x_{S_{z\bar{i}+1}}^{mp}; \\ y_{1_{i+1,j}}^u &= -X(\lambda_{i+1}) \sin \alpha_{\bar{x}i+1} \sin \alpha_{\bar{y}i+1} + Y(\lambda_{i+1}) (\cos \alpha_{\bar{x}i+1} \cos \varphi_{u\bar{i}+1} - \cos \alpha_{\bar{y}i+1} \sin \alpha_{\bar{x}i+1} \sin \varphi_{u\bar{i}+1}) + \\ &+ 0,5D_{\phi p} (\cos \alpha_{\bar{y}i+1} \sin \alpha_{\bar{x}i+1} \sin \varphi_{u\bar{i}+1} - \cos \alpha_{\bar{x}i+1} \cos \varphi_{u\bar{i}+1}) + a_{\phi p} \cos \alpha_{\bar{x}i+1} + y_{S_{z\bar{i}+1}}^{mp} - R_i; \\ z_{1_{i+1,j}}^u &= -X(\lambda_{i+1}) \cos \alpha_{\bar{x}i+1} \sin \alpha_{\bar{y}i+1} - Y(\lambda_{i+1}) (\sin \alpha_{\bar{x}i+1} \cos \varphi_{u\bar{i}+1} + \cos \alpha_{\bar{x}i+1} \cos \alpha_{\bar{y}i+1} \sin \varphi_{u\bar{i}+1}) + \\ &+ 0,5D_{\phi p} (\sin \alpha_{\bar{x}i+1} \cos \varphi_{u\bar{i}+1} + \cos \alpha_{\bar{x}i+1} \cos \alpha_{\bar{y}i+1} \sin \varphi_{u\bar{i}+1}) + z_{S_{z\bar{i}+1}}^{mp} - a_{\phi p} \sin \alpha_{\bar{x}i+1}; \\ (x_{1_{i+1,j}}^u - x_{1_{i,j}}^u) A_{N\bar{i}+1} &= (y_{1_{i+1,j}}^u - y_{1_{i,j}}^u) B_{N\bar{i}+1}; \\ (x_{1_{i+1,j}}^u - x_{1_{i,j}}^u) C_{N\bar{i}+1} &= (z_{1_{i+1,j}}^u - z_{1_{i,j}}^u) B_{N\bar{i}+1}. \end{aligned} \right\} (30)$$

- при выходе на торец, в конце рабочего хода:

$$\left. \begin{aligned}
 x_{1,i,j}^u &= X(\lambda_i) \cos \alpha_{yi} - Y(\lambda_i) \sin \alpha_{yi} \sin \varphi_{u\bar{ji}} + 0,5D_{\phi p} \sin \alpha_{yi} \sin \varphi_{u\bar{ji}} + x_{Szi}^{mp}; \\
 y_{1,i,j}^u &= -X(\lambda_i) \sin \alpha_{xi} \sin \alpha_{yi} + Y(\lambda_i) (\cos \alpha_{xi} \cos \varphi_{u\bar{ji}} - \cos \alpha_{yi} \sin \alpha_{xi} \sin \varphi_{u\bar{ji}}) + \\
 &+ 0,5D_{\phi p} (\cos \alpha_{yi} \sin \alpha_{xi} \sin \varphi_{u\bar{ji}} - \cos \alpha_{xi} \cos \varphi_{u\bar{ji}}) + a_{\phi p} \cos \alpha_{xi} + y_{Szi}^{mp} - R_i; \\
 z_{1,i,j}^u &= -X(\lambda_i) \cos \alpha_{xi} \sin \alpha_{yi} - Y(\lambda_i) (\sin \alpha_{xi} \cos \varphi_{u\bar{ji}} + \cos \alpha_{xi} \cos \alpha_{yi} \sin \varphi_{u\bar{ji}}) + \\
 &+ 0,5D_{\phi p} (\sin \alpha_{xi} \cos \varphi_{u\bar{ji}} + \cos \alpha_{xi} \cos \alpha_{yi} \sin \varphi_{u\bar{ji}}) + z_{Szi}^{mp} - a_{\phi p} \sin \alpha_{xi}; \\
 (x_{1,i,j}^u - x_{1,i+1,j}^u) A_{N\bar{i}+1} &= (y_{1,i,j}^u - y_{1,i+1,j}^u) B_{N\bar{i}+1}; \\
 (x_{1,i,j}^u - x_{1,i+1,j}^u) C_{N\bar{i}+1} &= (z_{1,i,j}^u - z_{1,i+1,j}^u) B_{N\bar{i}+1}.
 \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Параметры сечения среза при переменной подаче на зуб дисковой модульной фрезы определяется решением системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 x_{1,i,j}^u &= X(\lambda_i) \cos \alpha_{yi} - Y(\lambda_i) \sin \alpha_{yi} \sin \varphi_{uj} + 0,5D_{\phi p} \sin \alpha_{yi} \sin \varphi_{uj} + x_{Szi}^{mp}; \\
 y_{1,i,j}^u &= y_{1,i,j}^u = -X(\lambda_i) \sin \alpha_{xi} \sin \alpha_{yi} + Y(\lambda_i) (\cos \alpha_{xi} \cos \varphi_{uj} - \cos \alpha_{yi} \sin \alpha_{xi} \sin \varphi_{uj}) + \\
 &+ 0,5D_{\phi p} (\cos \alpha_{yi} \sin \alpha_{xi} \sin \varphi_{uj} - \cos \alpha_{xi} \cos \varphi_{uj}) + a_{\phi p} \cos \alpha_{xi} + y_{Szi}^{mp} - R_i; \\
 z_{1,i,j}^u &= -X(\lambda_i) \cos \alpha_{xi} \sin \alpha_{yi} - Y(\lambda_i) (\sin \alpha_{xi} \cos \varphi_{uj} + \cos \alpha_{xi} \cos \alpha_{yi} \sin \varphi_{uj}) + \\
 &+ 0,5D_{\phi p} (\sin \alpha_{xi} \cos \varphi_{uj} + \cos \alpha_{xi} \cos \alpha_{yi} \sin \varphi_{uj}) + z_{Szi}^{mp} - a_{\phi p} \sin \alpha_{xi}; \\
 x_{1,i+1,j}^u &= X(\lambda_{i+1}) \cos \alpha_{yi+1} - Y(\lambda_{i+1}) \sin \alpha_{yi+1} \sin \varphi_{u\bar{ji}+1} + 0,5D_{\phi p} \sin \alpha_{yi+1} \sin \varphi_{u\bar{ji}+1} + x_{Szi+1}^{mp}; \\
 y_{1,i+1,j}^u &= -X(\lambda_{i+1}) \sin \alpha_{xi+1} \sin \alpha_{yi+1} + Y(\lambda_{i+1}) (\cos \alpha_{xi+1} \cos \varphi_{u\bar{ji}+1} - \cos \alpha_{yi+1} \sin \alpha_{xi+1} \sin \varphi_{u\bar{ji}+1}) + \\
 &+ 0,5D_{\phi p} (\cos \alpha_{yi+1} \sin \alpha_{xi+1} \sin \varphi_{u\bar{ji}+1} - \cos \alpha_{xi+1} \cos \varphi_{u\bar{ji}+1}) + a_{\phi p} \cos \alpha_{xi+1} + y_{Szi+1}^{mp} - R_i; \\
 z_{1,i+1,j}^u &= -X(\lambda_{i+1}) \cos \alpha_{xi+1} \sin \alpha_{yi+1} - Y(\lambda_{i+1}) (\sin \alpha_{xi+1} \cos \varphi_{u\bar{ji}+1} + \cos \alpha_{xi+1} \cos \alpha_{yi+1} \sin \varphi_{u\bar{ji}+1}) + \\
 &+ 0,5D_{\phi p} (\sin \alpha_{xi+1} \cos \varphi_{u\bar{ji}+1} + \cos \alpha_{xi+1} \cos \alpha_{yi+1} \sin \varphi_{u\bar{ji}+1}) + z_{Szi+1}^{mp} - a_{\phi p} \sin \alpha_{xi+1}; \\
 x_{Szi+1}^{mp} &= (1 - \lambda_{i+1}^{mp})^3 \cdot x_0^{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{i+1}^{mp})^2 \cdot \lambda_{i+1}^{mp} x_{1mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{i+1}^{mp}) \cdot \lambda_{i+1}^{mp^2} \cdot x_{2mp} + \lambda_{i+1}^{mp^3} \cdot x_n^{mp}; \\
 y_{Szi+1}^{mp} &= (1 - \lambda_{i+1}^{mp})^3 \cdot y_0^{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{i+1}^{mp})^2 \cdot \lambda_{i+1}^{mp} y_{1mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{i+1}^{mp}) \cdot \lambda_{i+1}^{mp^2} \cdot y_{2mp} + \lambda_{i+1}^{mp^3} \cdot y_n^{mp}; \\
 z_{Szi+1}^{mp} &= (1 - \lambda_{i+1}^{mp})^3 \cdot z_0^{mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{i+1}^{mp})^2 \cdot \lambda_{i+1}^{mp} z_{1mp} + 3 \cdot (1 - \lambda_{i+1}^{mp}) \cdot \lambda_{i+1}^{mp^2} \cdot z_{2mp} + \lambda_{i+1}^{mp^3} \cdot z_n^{mp}; \\
 \alpha_{xi+1} &= \arctan(B_{pi+1} / C_{pi+1}); \\
 \alpha_{yi+1} &= \arctan(A_{pi+1} / (B_{pi+1} \sin \alpha_{xi+1} + C_{pi+1} \cos \alpha_{xi+1})); \\
 (x_{1,i,j}^u - x_{1,i+1,j}^u) A_{N\bar{i}+1} &= (y_{1,i,j}^u - y_{1,i+1,j}^u) B_{N\bar{i}+1}; \\
 (x_{1,i,j}^u - x_{1,i+1,j}^u) C_{N\bar{i}+1} &= (z_{1,i,j}^u - z_{1,i+1,j}^u) B_{N\bar{i}+1}; \\
 a &= \sqrt{(x_{1,i+1,j}^u - x_{1,i,j}^u)^2 + (y_{1,i+1,j}^u - y_{1,i,j}^u)^2 + (z_{1,i+1,j}^u - z_{1,i,j}^u)^2}.
 \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Зная координаты пересечения нормали с поверхностью текущего и последующего резцов, можно определить толщину слоя, срезаемого зубом при многокоординатной обработке зубчатого венца с пространственной геометрией при относительном перемещении РИ по пространственной траектории. Изменение толщины срезаемых слоев вдоль режущей кромки инструмента неравномерно: для пальцевой модульной фрезы изменяется до 15% (рисунок 8), дисковой модульной фрезы - в несколько раз (рисунок 9). Неравномерность распределение толщины среза вдоль режущей кромки объясняется как изменением кривизны самой режущей кромки, так и кривизны траектории относительного перемещения РИ.

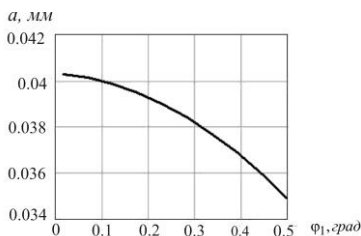


Рисунок 8 - Распределение толщины среза вдоль режущей кромки пальцевой модульной фрезы

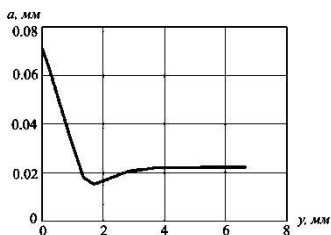


Рисунок 9 - Изменение толщины срезаемого слоя вдоль режущей кромки дисковой модульной фрезы, $m=3$ мм

зависит от значений компенсируемых передач перемещений, вызванных наличием погрешностей и деформаций. Неравномерность распределения толщины среза вдоль длины обрабатываемого зуба можно выровнять, непрерывно изменяя в процессе обработки подачу на зуб.

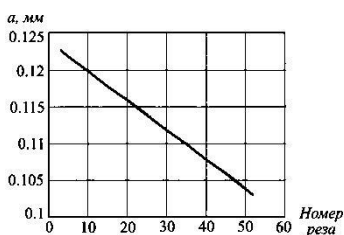
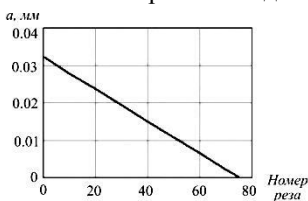
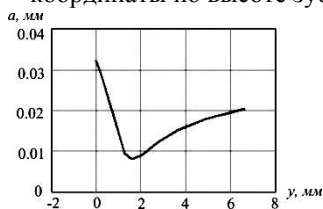


Рисунок 10 - Изменение толщины среза при врезании с поперечной подачей



а)

Рисунок 11 - Изменение толщины среза при выходе на торец заготовки: а – в зависимости от номера реза; б – в зависимости от координаты по высоте зуба



б)

Толщина срезаемых слоев по длине нарезаемых зубьев изменяется в зависимости от кривизны пространственной траектории относительного перемещения РИ, которая

При врезании с поперечной подачей максимальная толщина срезаемого слоя будет при входе зуба фрезы в заготовку на поверхности вершин (рисунок 10). Толщина срезаемого слоя при выходе зуба фрезы из заготовки не изменяется.

При выходе дисковой фрезы на торец заготовки параметры сечения среза также непрерывно изменяются как при изменении координаты по длине зуба (рисунок 11 а), так и при изменении координаты по высоте зуба (рисунок 11 б).

Четвертый раздел «Теоретические основы многокоординатного зубофрезерования цилиндрических колес с пространственной геометрией зубьев методом обкатки».

Разработаны способы многокоординатного зубофрезерования цилиндрических колес с пространственной геометрией зубьев методом обкатки червячной фрезой, которая в процессе формообразования перемещается по пространственной траектории, что позволяет нарезать зубья с геометрией наиболее приближенной к заданной теоретической. С червячной фрезой связана подвижная система

координат $x_0y_0z_0$, начало координат которой расположено на пересечении плоскости симметрии фрезы и ее оси вращения (рисунок 12). Инструмент вращается относительно оси O_0x_0 с угловой скоростью ω_0 . Для удобства осуществления расчетов выбрана промежуточная подвижная система координат $x_0''y_0''z_0''$, которая также связана с РИ. Начало координат O_0'' промежуточной системы координат $x_0''O_0''y_0''$ непрерывно изменяет свое местоположение, перемещаясь в относительном движении по пространственной траектории $a-a$. При этом непрерывно изменяется положение профилирующей плоскости $x_0''O_0''y_0''$, в которой на боковой поверхности зуба осуществляет формообразование эвольвентного профиля.

Движения формообразования (рисунок 12):

- главное движение B_1 – вращение червячной фрезы с угловой скоростью ω_1 относительно оси O_0x_0 ;
- движение подачи РИ P_3 – перемещение РИ вдоль пространственной траектории относительного перемещения $a-a$;
- движение обкатки B_{21} – вращение заготовки с угловой скоростью ω_{11} относительно оси O_1z_1 . Движение обкатки взаимосвязано с главным движением РИ;
- заготовке может придаваться дополнительное вращательное движение B_{22} – вращение заготовки с угловой скоростью ω_{12} относительно оси O_1z_1 . Дополнительное вращательное движение B_{22} может быть направлено как в одну сторону с движением обкатки B_{21} , так и в противоположную сторону и предназначено для обеспечения заданной глубины модификации боковой поверхности зубьев нарезаемого колеса или при нарезании зубчатых венцов с геометрией, наиболее приближенной к заданной пространственной.

Обработка по предложенному способу выполняется за два прохода, при этом за один рабочий ход обрабатываются противоположные части левой и правой боковых поверхностей зубьев.

В связи с возможностью введения дополнительного вращательного движения заготовки появляется возможность реализовать три способа обработки червячной фрезой цилиндрических зубчатых колес с пространственными геометриями зубьев:

- обработка с неизменным во времени движением обкатки;
- обработка с переменным во времени движением обкатки, когда к основному движению обкатки добавляется постоянное во времени дополнительное вращательное движение;
- обработка с переменным во времени движением обкатки, когда к основному движению обкатки добавляется переменное во времени дополнительное вращательное движение.

Разработана методика аналитического определения параметров пространственной траектории относительного перемещения РИ (рисунок 13), работающего по методу обкатки, при обработке зубчатых венцов с пространственной геометрией боковой поверхности зубьев. Полученные зависимости позволяют определять координаты узловых точек траектории относительного перемещения РИ в процессе многокоординатной обработки пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес.

Координаты точек пересечения профилирующей плоскости с боковой поверхностью зуба с пространственной геометрией, определяются системами уравнений:

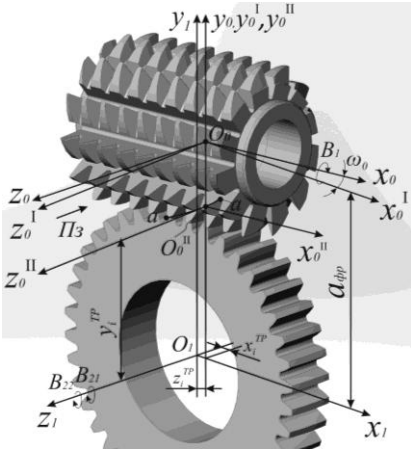


Рисунок 12. Многокоординатное формообразование пространственно-модифицированных зубьев червячной фрезой
- для внешнего зацепления

$$\begin{aligned}
 x_1 &= r_{b2} A x_1 (\sin(\varphi') - \varphi_2 \cos(\varphi')) - A x_2 \sin \phi_1 + A x_3 z_2 + A x_0; \\
 y_1 &= r_{b2} [(A y_1 + A y_2 \varphi_2) \cos(\varphi') + (A y_1 \varphi_2 - A y_2) \sin(\varphi')] + \\
 &+ A y_3 \cos \phi_1 + A y_4 \sin \phi_1 - A y_5 z_2 + A y_0; \\
 z_1 &= r_{b2} [(A z_1 - A z_2 \varphi_2) \cos(\varphi') + (A z_1 \varphi_2 + A z_2) \sin(\varphi')] + \\
 &+ A z_3 (\cos \phi_1 - \sin \phi_1) + A z_4 z_2 + A z_0; \\
 y_1 &= R_1 + t g \alpha \cdot x_1; \\
 \cos \alpha + \cos(\varphi_2 + \phi_{c-2p} + \phi_2) &= 0; \\
 A_{p_i} \cdot x_1 + B_{p_i} \cdot y_1 + C_{p_i} \cdot z_1 + D_{p_i} &= 0;
 \end{aligned}
 \tag{32}$$

- для внутреннего зацепления

$$\begin{aligned}
 x_1 &= r_{b2} A x_1 (\sin(\varphi') - \varphi_2 \cos(\varphi')) - A x_2 \sin \phi_1 + A x_3 z_2 + A x_0; \\
 y_1 &= r_{b2} [(A y_1 + A y_2 \varphi_2) \cos(\varphi') + (A y_1 \varphi_2 - A y_2) \sin(\varphi')] + \\
 &+ A y_3 \cos \phi_1 + A y_4 \sin \phi_1 - A y_5 z_2 + A y_0; \\
 z_1 &= r_{b2} [(A z_1 - A z_2 \varphi_2) \cos(\varphi') + (A z_1 \varphi_2 + A z_2) \sin(\varphi')] + \\
 &+ A z_3 (\cos \phi_1 - \sin \phi_1) + A z_4 z_2 + A z_0; \\
 y_1 &= R_1 + t g \alpha \cdot x_1; \\
 \cos \alpha - \cos(\varphi_2 + \phi_{c-2p} + \phi_2) &= 0; \\
 A_{p_i} \cdot x_1 + B_{p_i} \cdot y_1 + C_{p_i} \cdot z_1 + D_{p_i} &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{33}$$

| |
|--|
| 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ |
| 2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ТОЧЕК ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РИ |
| 3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛИРУЮЩЕЙ ПЛОСКОСТИ |
| 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ТОЧЕК ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ПРОФИЛИРУЮЩЕЙ ПЛОСКОСТИ С БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗУБА |
| 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДА ОТ x, y, z_i К x'_0, y'_0, z'_0 |
| 6. ПРИВЕДЕНИЕ КООРДИНАТ ТОЧЕК БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБА К ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСИ |
| 7. АППРОКСИМАЦИЯ КООРДИНАТ ТОЧЕК БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБА СПЛАЙНАМИ БЕЗЬЕ |
| 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКОВ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ x, y, z_i |
| 9. РАСЧЕТ КООРДИНАТ ТОЧЕК ПОЛУЧАЕМЫХ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБА |
| 10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ РАДИАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ РИ |
| 11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ РИ |
| 12. УТОЧНЕНИЕ КООРДИНАТ ТОЧЕК ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РИ |
| 13. АППРОКСИМАЦИЯ КООРДИНАТ ТОЧЕК ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РИ СПЛАЙНОМ БЕЗЬЕ |
| 14. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛИРУЮЩЕЙ ПЛОСКОСТИ |
| 15. УТОЧНЕНИЕ КООРДИНАТ ТОЧЕК ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ПРОФИЛИРУЮЩЕЙ ПЛОСКОСТИ С БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗУБА |
| 16. УТОЧНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДА ОТ x, y, z_i К x'_0, y'_0, z'_0 |
| 17. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УТОЧНЕННЫХ КООРДИНАТ ТОЧЕК ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ПРОФИЛИРУЮЩЕЙ ПЛОСКОСТИ С БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗУБА |
| 18. АППРОКСИМАЦИЯ УТОЧНЕННЫХ КООРДИНАТ ТОЧЕК БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБА СПЛАЙНАМИ БЕЗЬЕ |
| 19. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКОВ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ x, y, z_i |
| 20. РАСЧЕТ УТОЧНЕННЫХ КООРДИНАТ ТОЧЕК ПОЛУЧАЕМЫХ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБА |
| 21. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ НАРЕЗАЕМОЙ ГЕОМЕТРИИ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБА |

Рисунок 13. Методика определения параметров траектории относительного перемещения РИ при многокоординатном зубофрезеровании червячной фрезой

где φ' - угол, определяемый зависимостью:

$$\varphi' = \varphi_2 + \phi_{c_2P} - \phi_1 + \phi_2.$$

Координаты точек в сечении боковой поверхности зуба шестерни профилирующей плоскостью, приведенных к одному положению зуба и к вертикальной оси, аппроксимируются сплайнами Безье четвертого порядка:

$$\left. \begin{aligned} x_{101_w_i} &= (1 - \lambda_i^{e.o.})^4 x_{101_w_0} + 4 \cdot (1 - \lambda_i^{e.o.})^3 \lambda_i^{e.o.} x_{1_{e.o.}} + 6 \cdot (1 - \lambda_i^{e.o.})^2 \lambda_i^{e.o.2} x_{2_{e.o.}} + 4 \cdot (1 - \lambda_i^{e.o.}) \lambda_i^{e.o.3} x_{3_{e.o.}} + \lambda_i^{e.o.4} x_{101_w_4}; \\ y_{101_w_i} &= (1 - \lambda_i^{e.o.})^4 y_{101_w_0} + 4 \cdot (1 - \lambda_i^{e.o.})^3 \lambda_i^{e.o.} y_{1_{e.o.}} + 6 \cdot (1 - \lambda_i^{e.o.})^2 \lambda_i^{e.o.2} y_{2_{e.o.}} + 4 \cdot (1 - \lambda_i^{e.o.}) \lambda_i^{e.o.3} y_{3_{e.o.}} + \lambda_i^{e.o.4} y_{101_w_4}; \\ z_{101_w_i} &= (1 - \lambda_i^{e.o.})^4 z_{101_w_0} + 4 \cdot (1 - \lambda_i^{e.o.})^3 \lambda_i^{e.o.} z_{1_{e.o.}} + 6 \cdot (1 - \lambda_i^{e.o.})^2 \lambda_i^{e.o.2} z_{2_{e.o.}} + 4 \cdot (1 - \lambda_i^{e.o.}) \lambda_i^{e.o.3} z_{3_{e.o.}} + \lambda_i^{e.o.4} z_{101_w_4}, \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

где $x_{101_w_i}, y_{101_w_i}, z_{101_w_i}$ - координаты i -й точки боковой поверхности зуба шестерни в сечении профилирующей плоскостью; $x_{1_{e.o.}}, y_{1_{e.o.}}, z_{1_{e.o.}}, x_{2_{e.o.}}, y_{2_{e.o.}}, z_{2_{e.o.}}$ и $x_{3_{e.o.}}, y_{3_{e.o.}}, z_{3_{e.o.}}$ - координаты опорных точек сплайна; $\lambda_i^{e.o.}$ - i -й параметр сплайна.

В систему (34) входит 7 неизвестных и для определения координат опорных точек и значения параметра сплайна, необходимо систему уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} x_{101_w_0} &= (1 - \lambda_0^{e.o.})^4 x_{101_w_0} + 4 \cdot (1 - \lambda_0^{e.o.})^3 \lambda_0^{e.o.} x_{1_{e.o.}} + 6 \cdot (1 - \lambda_0^{e.o.})^2 \lambda_0^{e.o.2} x_{2_{e.o.}} + 4 \cdot (1 - \lambda_0^{e.o.}) \lambda_0^{e.o.3} x_{3_{e.o.}} + \lambda_0^{e.o.4} x_{101_w_4}; \\ y_{101_w_0} &= (1 - \lambda_0^{e.o.})^4 y_{101_w_0} + 4 \cdot (1 - \lambda_0^{e.o.})^3 \lambda_0^{e.o.} y_{1_{e.o.}} + 6 \cdot (1 - \lambda_0^{e.o.})^2 \lambda_0^{e.o.2} y_{2_{e.o.}} + 4 \cdot (1 - \lambda_0^{e.o.}) \lambda_0^{e.o.3} y_{3_{e.o.}} + \lambda_0^{e.o.4} y_{101_w_4}; \\ z_{101_w_0} &= (1 - \lambda_0^{e.o.})^4 z_{101_w_0} + 4 \cdot (1 - \lambda_0^{e.o.})^3 \lambda_0^{e.o.} z_{1_{e.o.}} + 6 \cdot (1 - \lambda_0^{e.o.})^2 \lambda_0^{e.o.2} z_{2_{e.o.}} + 4 \cdot (1 - \lambda_0^{e.o.}) \lambda_0^{e.o.3} z_{3_{e.o.}} + \lambda_0^{e.o.4} z_{101_w_4}; \\ x_{101_w_1} &= (1 - \lambda_1^{e.o.})^4 x_{101_w_0} + 4 \cdot (1 - \lambda_1^{e.o.})^3 \lambda_1^{e.o.} x_{1_{e.o.}} + 6 \cdot (1 - \lambda_1^{e.o.})^2 \lambda_1^{e.o.2} x_{2_{e.o.}} + 4 \cdot (1 - \lambda_1^{e.o.}) \lambda_1^{e.o.3} x_{3_{e.o.}} + \lambda_1^{e.o.4} x_{101_w_4}; \\ y_{101_w_1} &= (1 - \lambda_1^{e.o.})^4 y_{101_w_0} + 4 \cdot (1 - \lambda_1^{e.o.})^3 \lambda_1^{e.o.} y_{1_{e.o.}} + 6 \cdot (1 - \lambda_1^{e.o.})^2 \lambda_1^{e.o.2} y_{2_{e.o.}} + 4 \cdot (1 - \lambda_1^{e.o.}) \lambda_1^{e.o.3} y_{3_{e.o.}} + \lambda_1^{e.o.4} y_{101_w_4}; \\ z_{101_w_1} &= (1 - \lambda_1^{e.o.})^4 z_{101_w_0} + 4 \cdot (1 - \lambda_1^{e.o.})^3 \lambda_1^{e.o.} z_{1_{e.o.}} + 6 \cdot (1 - \lambda_1^{e.o.})^2 \lambda_1^{e.o.2} z_{2_{e.o.}} + 4 \cdot (1 - \lambda_1^{e.o.}) \lambda_1^{e.o.3} z_{3_{e.o.}} + \lambda_1^{e.o.4} z_{101_w_4}; \\ &\dots\dots\dots \\ x_{101_w_4} &= (1 - \lambda_4^{e.o.})^4 x_{101_w_0} + 4 \cdot (1 - \lambda_4^{e.o.})^3 \lambda_4^{e.o.} x_{1_{e.o.}} + 6 \cdot (1 - \lambda_4^{e.o.})^2 \lambda_4^{e.o.2} x_{2_{e.o.}} + 4 \cdot (1 - \lambda_4^{e.o.}) \lambda_4^{e.o.3} x_{3_{e.o.}} + \lambda_4^{e.o.4} x_{101_w_4}; \\ y_{101_w_4} &= (1 - \lambda_4^{e.o.})^4 y_{101_w_0} + 4 \cdot (1 - \lambda_4^{e.o.})^3 \lambda_4^{e.o.} y_{1_{e.o.}} + 6 \cdot (1 - \lambda_4^{e.o.})^2 \lambda_4^{e.o.2} y_{2_{e.o.}} + 4 \cdot (1 - \lambda_4^{e.o.}) \lambda_4^{e.o.3} y_{3_{e.o.}} + \lambda_4^{e.o.4} y_{101_w_4}; \\ z_{101_w_4} &= (1 - \lambda_4^{e.o.})^4 z_{101_w_0} + 4 \cdot (1 - \lambda_4^{e.o.})^3 \lambda_4^{e.o.} z_{1_{e.o.}} + 6 \cdot (1 - \lambda_4^{e.o.})^2 \lambda_4^{e.o.2} z_{2_{e.o.}} + 4 \cdot (1 - \lambda_4^{e.o.}) \lambda_4^{e.o.3} z_{3_{e.o.}} + \lambda_4^{e.o.4} z_{101_w_4}. \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Координаты прямолинейных участков режущей кромки червячной фрезы в системе координат шестерни $x_I y_I z_I$ определяются системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x_1^{u.f.p.} &= \cos \alpha_y x_0^{u.f.p.} + x_{cpi}; \\ y_1^{u.f.p.} &= -\sin \alpha_x \sin \alpha_y x_0^{u.f.p.} + \cos \alpha_x y_0^{u.f.p.} + y_{cpi}; \\ z_1^{u.f.p.} &= -\cos \alpha_x \sin \alpha_y x_0^{u.f.p.} - \sin \alpha_x y_0^{u.f.p.} + z_{cpi}, \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

где $x_0^{u.f.p.}$ и $y_0^{u.f.p.}$ - координаты концов отрезков, определяющих геометрию режущей кромки инструмента, которые определяются зависимостями:

- для левой режущей кромки

$$x_{10}^{u.f.p.} = \frac{z_0 \cdot y_{10}^{u.f.p.} + \pi \cdot m \cdot z_i^{u.кстр.} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right)}{z_0 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right)}, \quad (37)$$

- для правой режущей кромки

$$x_{p0}^{u, \text{фр.}} = \frac{z0 \cdot y_{p0}^{u, \text{фр.}} + \pi \cdot m \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) \cdot \left(z_i^{u, \text{инстр.}} + 0,5 \cdot z0\right)}{z0 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right)}, \quad (38)$$

где $y_{10}^{u, \text{фр.}}$ и $y_{p0}^{u, \text{фр.}}$ - координаты концов отрезков вдоль оси y_0O_0 . Координата $y_{10}^{u, \text{фр.}}$ принимает значения m и $-m$, координата $y_{p0}^{u, \text{фр.}}$ принимает значения $-m$ и m ;

$z0$ - число стружечных канавок червячной фрезы;

$z_i^{u, \text{инстр.}}$ - номер зуба инструмента, осуществляющего резание.

При обработке методом обкатки боковая поверхность зубьев получается с огранкой. Вследствие чего координаты точек реально нарезанного профиля можно разделить на две группы:

- точки пересечения прямолинейных участков двух соседних режущих кромок:

$$\left. \begin{aligned} x0_v o_{10ki}^{u, \text{фр.}} &= x0_{10ki}^{u, \text{фр.}} \cdot \cos(-\phi_{c-1} - \phi_{c-2P}) - y0_{10ki}^{u, \text{фр.}} \cdot \sin(-\phi_{c-1} - \phi_{c-2P}), \\ y0_v o_{10ki}^{u, \text{фр.}} &= x0_{10ki}^{u, \text{фр.}} \cdot \sin(-\phi_{c-1} - \phi_{c-2P}) + y0_{10ki}^{u, \text{фр.}} \cdot \cos(-\phi_{c-1} - \phi_{c-2P}), \\ z0_v o_{10ki}^{u, \text{фр.}} &= z0_{10ki}^{u, \text{фр.}}; \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

- точки пересечения прямолинейного участка левой режущей кромки с проекцией линии зацепления на профилирующую плоскость:

$$\left. \begin{aligned} x0_v o_{p,ki}^{n, \text{л.з.}} &= x0_{p,ki}^{n, \text{л.з.}} \cdot \cos(-\phi_{c-1} - \phi_{c-2P}) - y0_{p,ki}^{n, \text{л.з.}} \cdot \sin(-\phi_{c-1} - \phi_{c-2P}), \\ y0_v o_{p,ki}^{n, \text{л.з.}} &= x0_{p,ki}^{n, \text{л.з.}} \cdot \sin(-\phi_{c-1} - \phi_{c-2P}) + y0_{p,ki}^{n, \text{л.з.}} \cdot \cos(-\phi_{c-1} - \phi_{c-2P}), \\ z0_v o_{p,ki}^{n, \text{л.з.}} &= z0_{p,ki}^{n, \text{л.з.}}. \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

Значение радиальной коррекции положения червячной фрезы определяется при подстановке в уравнения сплайна (34), координат точек, получаемых при нарезании зуба:

$$\left. \begin{aligned} x0_v o_{p,ki}^{n, \text{л.з.}} &= \left(1 - \lambda_i^{6,0}\right)^4 x_{101_w0} + 4 \cdot \left(1 - \lambda_i^{6,0}\right)^3 \lambda_i^{6,0} x_{1,6,0} + 6 \cdot \left(1 - \lambda_i^{6,0}\right)^2 \lambda_i^{6,0,2} x_{2,6,0} + 4 \cdot \left(1 - \lambda_i^{6,0}\right) \lambda_i^{6,0,3} x_{3,6,0} + \lambda_i^{6,0,4} x_{101_w4}; \\ y0_v o_{p,ki}^{n, \text{л.з.}} &= \left(1 - \lambda_i^{6,0}\right)^4 y_{101_w0} + 4 \cdot \left(1 - \lambda_i^{6,0}\right)^3 \lambda_i^{6,0} y_{1,6,0} + 6 \cdot \left(1 - \lambda_i^{6,0}\right)^2 \lambda_i^{6,0,2} y_{2,6,0} + 4 \cdot \left(1 - \lambda_i^{6,0}\right) \lambda_i^{6,0,3} y_{3,6,0} + \lambda_i^{6,0,4} y_{101_w4} + k_{\pi}. \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

Значение радиальной коррекции в плоскости симметрии зубчатого венца определяется исходя из условий, что обеспечиваются минимальное относительное отклонение реально нарезанного профиля от теоретически рассчитанного и что траектория относительного перемещения РИ проходит через вертикальную ось впадины зуба:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x0_v o &= \left| \left(x_{101_w0}(\lambda_0) - x0_v o_{p,k,0}^{n, \text{л.з.}} \right) / x_{101_w0}(\lambda_0) \right|; \\ y_{101_w0}(\lambda_0) &= y0_v o_{p,k,0}^{n, \text{л.з.}}; \\ \Delta x0_v o &= \left| \left(x_{101_w_n}(\lambda_n) - x0_v o_{p,k,n}^{n, \text{л.з.}} \right) / x_{101_w_n}(\lambda_n) \right|; \\ y_{101_w_n}(\lambda_n) &= y0_v o_{p,k,n}^{n, \text{л.з.}}; \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

где $x_{101_w_i}(\lambda_0)$, $y_{101_w_i}(\lambda_0)$ - уравнения, описывающие теоретическую геометрию профиля зуба в сечении профилирующей плоскостью сплайнами Безье; $\Delta x0_v o$ -

величина отклонения теоретического значения координаты по толщине зуба от значения, которое будет получено в процессе нарезания.

Значение тангенциальной коррекции положения режущего инструмента определяется по зависимости:

$$k_{ii} = \frac{2x0_vo_0 \cdot x0_vo_n - x0_vo_n \cdot x0_vo_{p.k.0}^{n.l.z.} - x0_vo_0 \cdot x0_vo_{p.k.1}^{n.l.z.}}{x0_vo_0 + x0_vo_n} \quad (43)$$

Определение координат реально нарезаемого профиля с учетом того, что перемещения РИ осуществляется в плоскости профилирования:

- для точек пересечения прямолинейных участков двух соседних режущих кромок:

$$\left. \begin{aligned} xk_i^{p.k.} &= x_i^{p.k.} + k_{ii}^x; \\ yk_i^{p.k.} &= y_i^{p.k.} + k_{ii}^y; \\ zk_i^{p.k.} &= z_i^{p.k.}; \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

- для координат точек пересечения прямолинейного участка левой режущей кромки с проекцией линии зацепления на профилирующую плоскость:

$$\left. \begin{aligned} x0k_{p.k.i}^{n.l.z.} &= x0_{p.k.i}^{n.l.z.} + k_{ii}^x; \\ y0k_{p.k.i}^{n.l.z.} &= y0_{p.k.i}^{n.l.z.} + k_{ii}^y; \\ z0k_{p.k.i}^{n.l.z.} &= z0_{p.k.i}^{n.l.z.} \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

Уточненные координаты точек пространственной траектории относительно перемещения РИ определяются зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} x_i^{mp} &= k_{ii} \cos \alpha_y + k_{ri} \sin \alpha_y + x_{mpi}^{np}; \\ y_i^{mp} &= -k_{ii} \sin \alpha_x \sin \alpha_y + k_{ri} \cos \alpha_x + y_{mpi}^{np}; \\ z_i^{mp} &= -k_{ii} \cos \alpha_x \sin \alpha_y - k_{ri} \sin \alpha_x + z_{mpi}^{np}; \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

Рассмотрим зубчатую передачу внешнего зацепления $z_1=32$, $z_2=32$, $m=4$ мм, способной компенсировать три перемещения относительно координатных осей 0,125 мм и два поворота по $0,5^\circ$. Нарезание зубьев шестерни выполняется способом с тангенциальным смещением эвольвенты и постоянным радиальным смещением эвольвенты. В результате выполнения расчетов по представленной методике получим расчетное значение угла наклона траектории $91,5^\circ$ относительно перемещения РИ. При обработке зубчатого венца с перемещением РИ

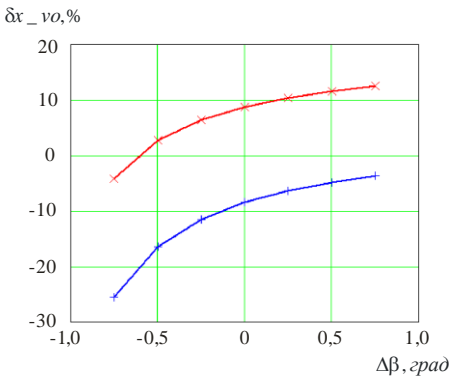


Рисунок 14. Максимальные отклонений координат по толщине зубьев в зависимости от изменения угла наклона траектории относительного перемещения РИ

по относительной траектории, параметры которой рассчитаны аналитически, максимальные отклонения в координатах по толщине зуба на головке и ножке зуба примерно равны и не превышают 9% (рисунок 14).

Как видно из графиков на рисунке 14, при отклонении угла наклона траектории относительного перемещения РИ от расчетного значения максимальная величина погрешностей растет, а также неравномерно распределяются отклонения на головке и ножке зуба шестерни.

Многокоординатная обработка зубчатых венцов с пространственной геометрией зубьев методом обкатки позволяет получать, приближенную к заданной пространственной геометрии зубьев с высокой точностью. Отклонения координат по толщине зуба при обработке червячной фрезой и перемещении РИ по пространственной траектории не превышает 5%.

Геометрия профиля зуба червячной фрезы в нормальном сечении может быть аппроксимирована сплайном Безье 5-го порядка. Применение сплайнов Безье пятого порядка позволяет с высокой точностью описать геометрию профиля червячной фрезы в нормальном сечении, относительная погрешность в определении координат $X(\lambda)$ и $Y(\lambda)$ не превышает 1%.

Пятый раздел «Теоретические основы контроля зубьев цилиндрических колес с пространственными геометриями боковой поверхности».

Получать измерительную информацию предложено с использованием 3-D сканирования. В результате 3-D сканирования, в зависимости от точности дискретизации модели, можно оценить практически все параметры точности зубчатого колеса. В данной работе остановимся на определении толщины зубьев шестерни с геометрией, приближенной к пространственной, в зависимости от координат по длине и высоте зуба. После 3-D сканирования получается STL (от англ. stereolithography) модель контролируемого изделия. С помощью специальных программ STL файл модели преобразуется в файл сетки с расширением OBJ. Файл формата OBJ содержит только геометрию измеряемой 3-D модели - координаты каждой вершины сетки, связь координат текстуры с вершиной, нормаль для каждой вершины, а также параметры, которые создают полигоны. Открыв файл сетки в формате OBJ, получим тем самым координаты всех узловых точек сетки для всех поверхностей модели, в том числе и координаты точек сетки на боковой поверхности зубьев.

Для привязке модели к глобальной системе координат используем объекты, которые есть на изображении, например, положение оси оправки, на которую в процессе измерения устанавливается шестерня, будет определять реальное положение зубьев измеряемого зубчатого венца. В качестве геометрической фигуры, с известными размерами, на рассматриваемом изображении используем кромку пересечения базовой цилиндрической поверхности оправки и ее верхний торец. Кромка описывается окружностью, параметры которой определяются решением системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (x_1 - x_{ц.о})^2 + (y_1 - y_{ц.о})^2 &= R_o^2; \\ (x_2 - x_{ц.о})^2 + (y_2 - y_{ц.о})^2 &= R_o^2; \\ (x_3 - x_{ц.о})^2 + (y_3 - y_{ц.о})^2 &= R_o^2, \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

где $x_{ц.о.}$, $y_{ц.о.}$ - значения координат точки центра окружности; $R_{ц.о.}$ - радиус окружности; x_i , y_i - координаты точек, которые принадлежат кромке на пересечении цилиндрической поверхности оправки и верхнего торца оправки.

Координаты центра окружности являются координатами первой точки, принадлежащей оси оправки. При этом ось оправки перпендикулярна плоскости верхнего торца оправки. Координаты второй точки, принадлежащей оси, определяются зависимостями:

$$x_{н.к.} = \frac{C \cdot x_{ц.о.} - A \cdot z_{ц.о.}}{C} \quad (48)$$

$$y_{н.к.} = \frac{B(z - z_{ц.о.}) + C \cdot y_{ц.о.}}{C}; \quad (49)$$

где A, B, C, D - коэффициенты в уравнении плоскости верхнего торца оправки:

$$\begin{aligned} A &= y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) + y_3(z_1 - z_2), \\ B &= x_1(z_3 - z_2) + x_2(z_1 - z_3) + x_3(z_2 - z_1), \\ C &= x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2), \\ D &= x_1(y_3z_2 - y_2z_3) + x_2(y_1z_3 - y_3z_1) + x_3(y_2z_1 - y_1z_2) \end{aligned} \quad (50)$$

$z_{ц.о.}$ - третья координата центра окружности:

$$z_{ц.о.} = \frac{-A \cdot x_{ц.о.} - B \cdot y_{ц.о.} - D}{C} \quad (51)$$

Истинные значения координат точек определяются с учетом масштабного коэффициента модели:

$$\mu = \frac{R}{R_o}, \quad (52)$$

где R - физический размер окружности.

Данные полученные в результате 3-D сканирования и последующей обработки для удобства сортировки, приведем к новому началу координат, расположенному в точке с координатами $x_{н.к.}$ и $y_{н.к.}$:

$$\left. \begin{aligned} x &= \mu(x_{т.л.з.м} - x_{н.к.}), \\ y &= \mu(y_{т.л.з.м} - y_{н.к.}), \\ z &= \mu(z_{т.л.з.м}) \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

где $x_{т.л.з.м}$, $y_{т.л.з.м}$, $z_{т.л.з.м}$ - координаты узловых точек сетки, полученные в результате 3-D сканирования и последующей обработки.

Для удобства сравнения измеренных координат точек боковой поверхности зубьев с соответствующими им теоретическими значениями приведем полученную измерительную информацию к системе координат модели (рисунок 15)

Система уравнений при переходе от системы координат модели $x_M y_M z_M$ к абсолютной системе координат $xуz$:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_M \cos \varphi_y + z_M \sin \varphi_y + x_{O_M}; \\ y &= -x_M \sin \varphi_x \sin \varphi_y + y_M \cos \varphi_x + z_M \cos \varphi_y \sin \varphi_x + y_{O_M}; \\ z &= -x_M \cos \varphi_x \sin \varphi_y - y_M \sin \varphi_x + z_M \cos \varphi_x \cos \varphi_y + z_{O_M}. \end{aligned} \right\} \quad (54)$$

Система уравнений при переходе от абсолютной системы координат xuz к системе координат модели $x_M y_M z_M$:

$$\left. \begin{aligned} x_M &= x \cos \varphi_y - y \sin \varphi_x \sin \varphi_y - z_M \cos \varphi_x \sin \varphi_y + y_{O_M} \sin \varphi_x \sin \varphi_y - x_{O_M} \cos \varphi_y + z_{O_M} \cos \varphi_x \sin \varphi_y; \\ y_M &= y_M \cos \varphi_x - z_M \sin \varphi_x + z_{O_M} \sin \varphi_x - y_{O_M} \cos \varphi_x; \\ z_M &= x \sin \varphi_y + y_M \sin \varphi_x \cos \varphi_y + z_M \cos \varphi_x \cos \varphi_y - x_{O_M} \sin \varphi_y - y_{O_M} \sin \varphi_x \cos \varphi_y - z_{O_M} \cos \varphi_x \cos \varphi_y. \end{aligned} \right\} (55)$$

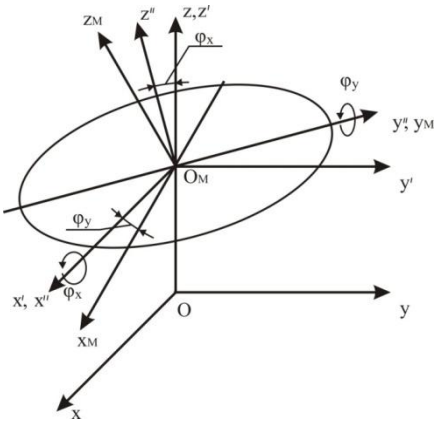


Рисунок 15. Переход от абсолютной системы координат xuz к системе координат модели $x_M y_M z_M$

длина буртика.

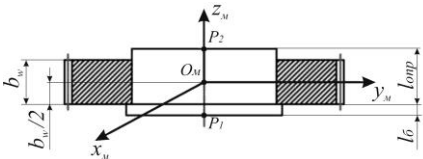


Рисунок 16. Положение начала координат системы координат модели

системы координат модели.

Координаты центра отрезка $x_{m.o.}$ и $y_{m.o.}$, определяющего толщину зуба на поверхности вершин зубьев (рисунок 17):

$$x_{m.o.} = \frac{x_{л.п.} + x_{п.п.}}{2}, \quad y_{m.o.} = \frac{y_{л.п.} + y_{п.п.}}{2}, \quad (60)$$

где $x_{л.п.}, y_{л.п.}$ и $x_{п.п.}, y_{п.п.}$ — соответственно координаты, точек принадлежащих левому и правому профилю рассматриваемого зуба.

Приведение координат точек боковой поверхности зубьев к вертикальной оси осуществляется по зависимостям:

Координаты $x_{O_M}, y_{O_M}, z_{O_M}$ точки начала координат O_M модели определяются зависимостями (рисунок 16):

$$\begin{aligned} x_{O_M} &= \frac{\mu \cdot \lambda_{O_M} \cdot (x_{ц.о.} - x_{п.к.})}{1 + \lambda_{O_M}}; \\ y_{O_M} &= \frac{\mu \cdot \lambda_{O_M} \cdot (y_{ц.о.} - y_{п.к.})}{1 + \lambda_{O_M}}; \\ z_{O_M} &= \frac{\mu \cdot \lambda_{O_M} \cdot z_{ц.о.}}{1 + \lambda_{O_M}}, \end{aligned} \quad (56)$$

где λ_{O_M} - параметр, устанавливающий отношение в котором делится отрезок (рисунок 16):

$$\lambda_{O_M} = \frac{b_w + 2 \cdot l_b}{2 \cdot l_{opr} - b_w}, \quad (57)$$

где l_{opr} - длина оправки между верхним ее торцом и базовым торцом буртика; l_b -

Параметры перехода от системы координат модели $x_M y_M z_M$ к абсолютной системе координат xuz :

$$\varphi_x = \arctg \left(\frac{y_{O_M}^{+1} - y_{O_M}}{z_{O_M}^{+1} - z_{O_M}} \right); \quad (58)$$

$$\varphi_y = \arccos \left(\frac{z_{O_M}^{+1} - z_{O_M}}{\cos \varphi_x} \right). \quad (59)$$

где $y_{O_M}^{+1}$ и $z_{O_M}^{+1}$ - координаты точек на осях

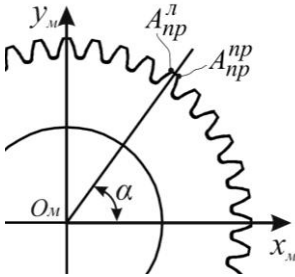


Рисунок 17. Определение координат точки, принадлежащей оси симметрии зуба

- для внешнего зацепления

$$\left. \begin{aligned} z_M^e &= r_{b2} [(Az_1 - Az_2 \varphi_2) \cos(\varphi') + (Az_1 \varphi_2 + Az_2) \sin(\varphi')] + Az_3 (\cos \phi_1 - \sin \phi_1) + Az_4 z_2 + Az_0; \\ E_0 + E_1 \sin \phi_1 + E_2 \sin(\varphi') + E_3 z_2 + E_4 \varphi_2 + Ay_3 \cos \phi_1 + Ay_1 r_{b2} (\cos(\varphi') + \varphi_2 \sin(\varphi')) &= 0; \\ \cos \alpha + \cos(\varphi' + \phi_1) &= 0; \\ (r_{b2} Ax_1 (\sin(\varphi') - \varphi_2 \cos(\varphi')) - Ax_2 \sin \phi_1 + Ax_3 z_2 + Ax_0)^2 + \\ + (r_{b2} [(Ay_1 + Ay_2 \varphi_2) \cos(\varphi') + (Ay_1 \varphi_2 - Ay_2) \sin(\varphi')] + Ay_3 \cos \phi_1 + Ay_4 \sin \phi_1 - Ay_5 z_2 + Ay_0)^2 &= \\ = x_M^e{}^2 + y_M^e{}^2. \end{aligned} \right\} (63)$$

- для внутреннего зацепления

$$\left. \begin{aligned} z_M^e &= r_{b2} [(Az_1 - Az_2 \varphi_2) \cos(\varphi') + (Az_1 \varphi_2 + Az_2) \sin(\varphi')] + Az_3 (\cos \phi_1 - \sin \phi_1) + Az_4 z_2 + Az_0; \\ E_0 + E_1 \sin \phi_1 + E_2 \sin(\varphi') + E_3 z_2 + E_4 \varphi_2 + Ay_3 \cos \phi_1 + Ay_1 r_{b2} (\cos(\varphi') + \varphi_2 \sin(\varphi')) &= 0; \\ \cos \alpha - \cos(\varphi' + \phi_1) &= 0; \\ (r_{b2} Ax_1 (\sin(\varphi') - \varphi_2 \cos(\varphi')) - Ax_2 \sin \phi_1 + Ax_3 z_2 + Ax_0)^2 + \\ + (r_{b2} [(Ay_1 + Ay_2 \varphi_2) \cos(\varphi') + (Ay_1 \varphi_2 - Ay_2) \sin(\varphi')] + Ay_3 \cos \phi_1 + Ay_4 \sin \phi_1 - Ay_5 z_2 + Ay_0)^2 &= \\ = x_M^e{}^2 + y_M^e{}^2. \end{aligned} \right\} (64)$$

где E_i - коэффициенты, определяемые по зависимостям:

$$\begin{aligned} E_0 &= Ay_0 - R_1 - Ax_0 \tan(\alpha); \\ E_1 &= Ay_4 - Ax_2 \tan(\alpha) \\ E_2 &= -Ay_2 r_{b2} - Ax_1 r_{b2} \tan(\alpha) \\ E_3 &= -Ay_5 - Ax_3 \tan(\alpha) \\ E_4 &= Ay_2 r_{b2} + Ax_1 r_{b2} \tan(\alpha) \end{aligned} \quad (65)$$

Теоретические значение определяются системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x_1^t &= r_{b2} Ax_1 (\sin(\varphi_2 + \phi_{c_{-2p}} - \phi_1 + \phi_2) - \varphi_2 \cos(\varphi_2 + \phi_{c_{-2p}} - \phi_1 + \phi_2)) - \\ - Ax_2 \sin \phi_1 + Ax_3 z_2 + Ax_0; \\ y_1^t &= r_{b2} [(Ay_1 + Ay_2 \varphi_2) \cos(\varphi_2 + \phi_{c_{-2p}} - \phi_1 + \phi_2) + (Ay_1 \varphi_2 - Ay_2) \sin(\varphi_2 + \phi_{c_{-2p}} - \phi_1 + \phi_2)] + \\ + Ay_3 \cos \phi_1 + Ay_4 \sin \phi_1 - Ay_5 z_2 + Ay_0. \end{aligned} \right\} (66)$$

$$\left. \begin{aligned} x_M^e &= x_M \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) - y_M \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right); \\ y_M^e &= x_M \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) + y_M \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right); \\ z_M^e &= z_M. \end{aligned} \right\} (61)$$

где α - угол между горизонтальной осью системы координат и осью симметрии зуба:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{y_{л.н.} + y_{н.н.}}{x_{л.н.} + x_{н.н.}}\right). \quad (62)$$

Определения параметров контактирования зубьев для измеренных координат точки, принадлежащей боковой поверхности зуба выполняется решением систем уравнений:

Шестой раздел «Автоматизация определения параметров сечения среза при многокоординатном зубофрезеровании зубчатых венцов с пространственной геометрией зубьев. Экспериментальное получение зубчатых венцов»

Разработаны алгоритмы программных блоков и выведены зависимости, которые позволяют автоматизировать самые трудоемкие расчетные операции по определению параметров срезаемых слоев и переменных величин режимов резания при многокоординатном зубофрезеровании.

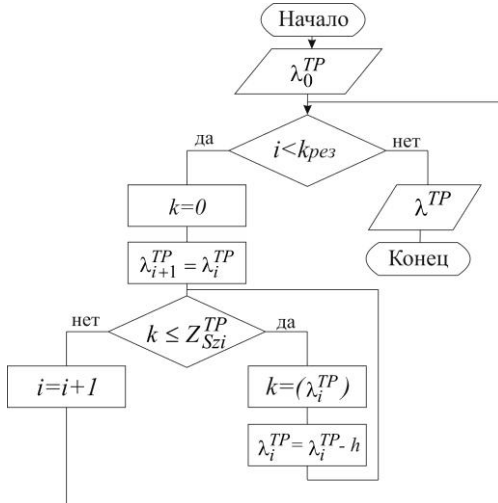


Рисунок 18. Алгоритм расчета параметров сплайна траектории относительного перемещения РИ

$\varphi_{ui,j}$. Цикл “While” обеспечивает расчет приближенного значения угла развёрнутости эвольвенты $\varphi_{i,j}$ пока не выполнится условие $k_{i,j} \geq k_{11в,j}$. Точность подбора угла развёрнутости эвольвенты $\varphi_{i,j}$ зависит от шага $h_{\varphi 1}$. Параметры расчетного модуля программ:

$$k_{i,j} = A31_{i,j} \cos \varphi_{ui,j} + A32_{i,j} \sin \varphi_{ui,j}; \quad (67)$$

$$k_{11в,j} = \frac{A12_{i,j}}{r_{b1} \left[\sin \left(\frac{\pi}{z_1} + \varphi_{i,j} - \phi_{c-1} \right) - \varphi_{i,j} \cos \left(\frac{\pi}{z_1} + \varphi_{i,j} - \phi_{c-1} \right) \right]}, \quad (68)$$

где $\varphi_{ui,j}$ - угол поворота пальцевой модульной фрезы:

$$\varphi_{ui,j} = \arcsin \left[\frac{-A11_{i,j} \cdot A22_{i,j} \pm \sqrt{DA_{i,j}}}{-r_{b1} \left[\sin \left(\frac{\pi}{z_1} + \varphi_{i,j} - \phi_{c-1} \right) - \varphi_{i,j} \cos \left(\frac{\pi}{z_1} + \varphi_{i,j} - \phi_{c-1} \right) \right] \cdot \left((A21_{i,j})^2 + (A22_{i,j})^2 \right)} \right], \quad (69)$$

где $DA_{i,j}$ - дискриминант квадратного уравнения, для определения $\varphi_{ui,j}$;

Определение параметров сплайна λ_i^{mp} траектории относительного перемещения РИ выполняется решением уравнения (18) численными методами, с использованием алгоритма рисунке 18.

Для решения системы уравнений (25) относительно координат $x_{1i,j}^u$, $y_{1i,j}^u$, $z_{1i,j}^u$ и углов φ_{uj} и φ_{li} используются численные методы и аналитически полученные зависимости, алгоритм программы рисунок 19. В программу заложены три цикла: два цикла “For” и один цикл “While”. Циклы “For” обеспечивают перебор по матрице значений изменяющихся углов развёрнутости эвольвенты $\varphi_{i,j}$ и углов поворота пальцевой модульной фрезы

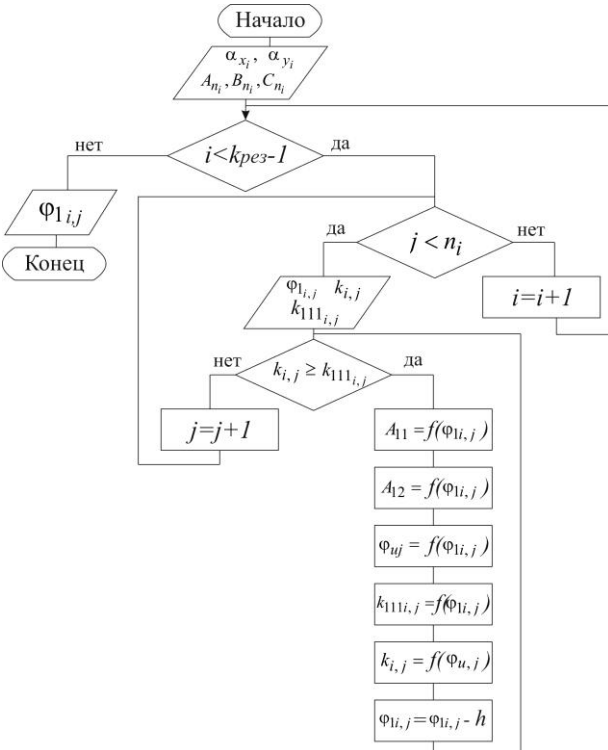


Рисунок 19. Алгоритм расчета угла развёрнутости эвольвенты $\varphi_{i,j}$

являются по зависимостям:

$$a = 3z_{1mp} - 3z_{2mp} + z_n^{mp} - z_0^{mp}; \quad b = 3z_0^{mp} - 6z_{1mp} + 6z_{2mp}; \quad c = 3z_{1mp} - 3z_0^{mp}; \quad d = -z_{Szi}^{mp} - S_{zi+1} + z_0^{mp}; \quad (72)$$

Определение координат точек пересечения нормали с предыдущей поверхностью резания выполняется решением системы уравнений (30). Решить систему относительно координат рассматриваемой точки режущей кромки $x_{1i,j}^u, y_{1i,j}^u, z_{1i,j}^u$, угла поворота фрезы $\varphi_{u,j+1}$ и параметра сплайна рассматриваемой точки на режущей кромке λ_{i+1} можно используя численные методы и аналитически полученные зависимости в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 20.

Применение зависимостей на практике позволит сократить затраты времени на выполнение технологической подготовки производства при разработке технологических процессов многокоординатной обработки зубчатых венцов цилиндрических зубчатых колес с пространственной геометрией зубьев.

$A_{11,i,j}$ и $A_{12,i,j}$ - переменные коэффициенты расчетного модуля программы; $A_{111,i,j}$, $A_{112,i,j}$, $A_{21,i,j}$, $A_{22,i,j}$, $A_{31,i,j}$, $A_{32,i,j}$ - постоянные коэффициенты расчетного модуля программы.

Получено аналитически решение кубического уравнения (18), определяющего распределение параметров сплайнов, соответствующих заданным значениям координаты по длине зуба z_{Szi}^{mp} :

$$y^3 + 3 \cdot p \cdot y + 2 \cdot q = 0. \quad (70)$$

где y – переменная, зависящая от параметра сплайна:

$$y = \lambda_{q+1}^{mp} + \frac{b}{3 \cdot a}; \quad (71)$$

$3 \cdot p$ и $2 \cdot q$ - коэффициенты в уравнении (70), составляющие которых опреде-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена **актуальная научно-техническая проблема** повышения точности многокоординатного фрезерования зубьев цилиндрических колес с пространственной геометрией боковой поверхности, способной компенсировать комплекс перемещений, вызванных наличием погрешностей изготовления, монтажа и деформаций элементов зубчатых передач в процессе эксплуатации, за счет пространственного подхода к решению технологических задач и аналитического описания взаимосвязи геометрии боковой поверхности зубьев, геометрии РИ и траекторий относительного перемещения инструмента и заготовки в процессе формообразования.

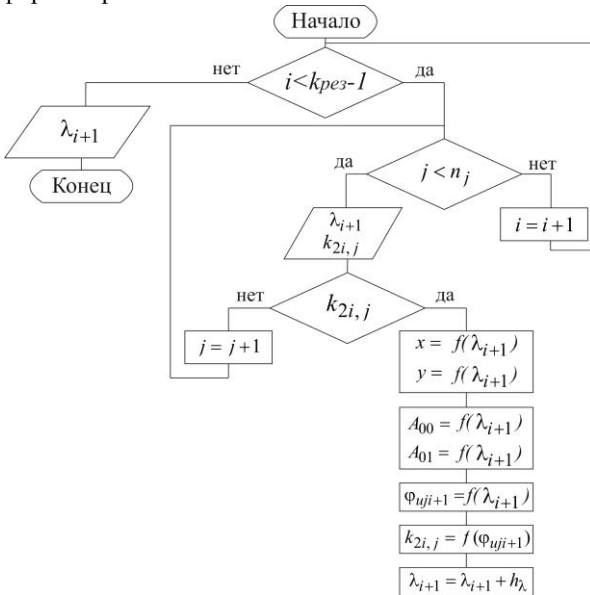


Рисунок 20. Алгоритм расчета координат точек пересечения нормали с предыдущей поверхностью резания при описании геометрии режущей кромки сплайном Безье пятого порядка

форме получаемой боковой поверхности зубьев или разрабатывались для получения зубчатых колес определенной конструкции. Вместе с тем возможности существующего технологического оборудования по нарезанию зубчатых венцов с заданными геометрическими параметрами зубьев раскрыты не в полной мере из-за отсутствия общих подходов в проектировании зубчатых венцов с пространственными геометриями и отсутствия аналитических зависимостей для расчета параметров процесса формообразования, которые связывали бы геометрию боковой поверхности зубьев, геометрию режущего инструмента и кинематику их относительных движений.

2. Разработан ФОКТП повышения надежности, долговечности и нагрузочной способности цилиндрических зубчатых передач. ФОКТП включает этапы в

1. В результате анализа существующих конструктивных и технологических методов повышения надежности, долговечности и нагрузочной способности цилиндрических зубчатых колес установлено, что в настоящий момент отсутствуют универсальные геометрии зубьев, способные компенсировать все перемещения зубчатых венцов, вызванных наличием погрешностей изготовления, монтажа и деформациями в процессе эксплуатациями. Известные технологические способы формообразования зубчатых венцов, применяемое при этом оборудование и РИ имеют технологические ограничения по

пределах жизненного цикла изделий с цилиндрическими зубчатыми колесами, реализация которых позволяет осуществлять как сквозное, так и итерационное проектирование зубчатых венцов с пространственной геометрией боковой поверхности зубьев, способных компенсировать все перемещения вызванные наличием погрешностей изготовления, монтажа и деформаций элементов передач, возникающих в процессе их эксплуатации.

3. В работе получены в обобщенном виде зависимости, позволяющие определять параметры пространственной геометрии боковой поверхности зубьев цилиндрических колес, соединения, на основе которой способны компенсировать комплекс перемещений и поворотов сопряженных зубчатых венцов, вызванных наличием погрешностей изготовления, погрешностей монтажа и деформациями элементов зубчатых передач. Зависимости основываются на расширении кинематического метода о минимальности мгновенного радиуса поворота из полюса зацепления в точку контакта двух сопряженных профилей для пространственного соединения цилиндрических зубчатых колес внешнего и внутреннего зацеплений, в том числе и с внутренним зацеплением с передаточным числом равным единице.

4. На основании выполненных теоретических исследований разработана методология синтеза зубчатых колес с новой комплексной пространственной геометрией боковой поверхности зубьев. Разработана методика аппроксимации геометрии боковой поверхности зубьев цилиндрических колес с пространственной геометрией сеткой сплайнов Безье третьего порядка.

5. Разработаны теоретические основы повышения точности многокоординатного фрезерования зубьев методом копирования, которые основываются на том, что РИ в процессе формообразования перемещается по пространственной траектории относительного перемещения, что позволяет найти такое положение профилирующей плоскости в пространстве, которое обеспечит минимизацию отклонений нарезаемого профиля зубьев от теоретического и таким образом повысить точность зубчатых венцов. На основании этого разработаны технологические способы нарезания зубчатых венцов с пространственной геометрией зубьев пальцевой и дисковой модульными фрезами.

6. Разработана методика аналитического определения параметров пространственной траектории относительного перемещения РИ, работающего по методу копирования, при многокоординатной обработке зубчатых венцов, которая основывается на установлении взаимосвязи между геометрией боковой поверхности нарезаемых зубьев и геометрией режущей кромки инструмента.

Использование предложенной методики позволяет определять основные параметры процесса многокоординатной обработки зубчатых венцов с пространственной геометрией зубьев при перемещении РИ по пространственной криволинейной траектории. Аналитическое определение параметров позволяет минимизировать отклонения координат по толщине зуба от их теоретических значений при обработке специально спрофилированным РИ до 3%, а при обработке стандартным РИ – до 5%.

7. В результате решения пространственной задачи формообразования зубчатого венца методом копирования получены аналитические зависимости для

определения толщины срезаемых слоев в зависимости от геометрии режущей кромки инструмента и кривизны пространственной траектории относительного перемещения РИ. При этом установлено, что толщина срезаемых слоев распределяется неравномерно как по длине режущей кромки, так и вдоль траектории относительного перемещения РИ.

Изменение толщины срезаемых слоев вдоль режущей кромки инструмента, связано с особенностями ее геометрии, и для пальцевой модульной фрезы изменяется до 15%, а для дисковой модульной фрезы - до 3 раз.

Изменение толщины срезаемых слоев по длине нарезаемых зубьев зависит от кривизны пространственной траектории относительного перемещения РИ, которая зависит от значений компенсируемых передач перемещений, вызванных наличием погрешностей и деформаций. Непрерывное изменение подачи на зуб фрезы при перемещении по пространственной траектории позволяет компенсировать неравномерность распределения толщины среза вдоль длины обрабатываемого зуба.

8. Разработаны теоретические основы повышения точности многокоординатного фрезерования зубьев методом обкатки, которые основываются на том, что РИ в процессе формообразования перемещается по пространственной траектории относительного перемещения, что позволяет найти такое положение профилирующей плоскости в пространстве, которое обеспечит минимизацию отклонений нарезаемого профиля зубьев от теоретического и таким образом повысить точность зубчатых венцов. На основании этого разработаны технологические способы нарезания зубчатых венцов с пространственной геометрией зубьев червячной фрезой.

9. Разработана методика аналитического определения параметров пространственной траектории относительного перемещения РИ, работающего по методу обкатки, при многокоординатной обработке зубчатых венцов, которая основывается на установлении взаимосвязи между геометрией боковой поверхности нарезаемых зубьев и геометрией режущей кромки инструмента.

Использование предложенной методики позволяет определять основные параметры процесса многокоординатной обработки зубчатых венцов с пространственной геометрией зубьев при перемещении РИ по пространственной криволинейной траектории. Аналитическое определение параметров позволяет минимизировать отклонения координат по толщине зуба от их теоретических значений. При перемещении РИ по пространственной траектории отклонения не превышают 5%, а при обработке с тангенциальным смещением РИ и постоянным значением радиальной коррекции – не более 9%.

10. Разработаны теоретические основы контроля и последующей обработки результатов измерений зубьев цилиндрических колес с пространственными геометриями боковой поверхности, которые основываются на обработке данных полученных в результате 3-D сканирования модели. Полученные зависимости позволяют установить характер изменения толщины зуба от его высоты и координаты по его длине и выполнять сравнение измеренных координат точек боковой поверхности зубьев с соответствующими им теоретическими значениями координат этих точек.

11. Разработаны алгоритмы программных блоков и получены зависимости, позволяющие автоматизировать наиболее трудоемкие расчетные операции по определению параметров срезаемых слоев и переменных значений режимов резания при многокоординатном фрезеровании зубьев. Представленный подход позволяет сократить затраты времени на выполнение технологической подготовки производства при разработке технологических процессов многокоординатной обработки зубчатых венцов цилиндрических зубчатых колес с пространственной геометрией зубьев.

12. Экспериментально получены зубья шестерни с геометрией, приближенной к комплексной пространственной, на существующем серийном оборудовании стандартным режущим инструментом методом обкатки. Результаты работы внедрены в учебный процесс и в производство.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях

1. Гитуни, А. Синтез структуры технологических процессов изготовления пространственно-модифицированных зубьев муфты в зависимости от условий перекоса осей валов [Текст] / А. Гитуни, А.Н. Михайлов, **Р.М. Грубка**, Д.А. Михайлов // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – Вип.. 37, стр. 49 - 56.

2. **Грубка, Р.М.** Фрезерование зубьев втулок муфт с пространственной геометрией методом обкатки [Текст] / **Р.М. Грубка**, А.Н. Михайлов, Л.Н. Феник, Е.С. Тарасова // Известия ТулГУ. Технические науки — Тула: Изд. ТулГУ, 2013. — Вып. 8. — С. 56-62.

3. **Грубка, Р.М.** Визначення координат точок, які належать до осей симетрії зубців зубчастої втулки в перерізі площиною, паралельною базовому торцю [Текст] / **Р.М. Грубка**// Вісник ДонНУЕТ. Сер. Технічні науки. – 2013. - №1(57). – С. 22-26.

4. **Грубка, Р.М.** Определение связи между координатами точки, измеренными в секущей плоскости и координатой, определяющей ширину зубчатого венца втулки [Текст] / **Р.М. Грубка**// Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. — Донецьк: Донец. нац. техн. ун-т, 2013. — Вип. 1,2 (45). — С.102-107.

5. **Грубка, Р.М.** Определение толщины зуба пространственно-модифицированного зубчатого венца втулки зубчатой муфты [Текст] / **Р.М. Грубка**// Наукові праці ДонНТУ. Серія: Машинобудування і машинознавство. — Донецьк: Донец. нац. техн. ун-т, 2013. — Вип. 1(10). – С. 175-182.

6. Михайлов, А.Н. Повышение долговечности деталей машин на базе функционально-ориентированных покрытий [Текст] / А.Н. Михайлов, Д.А. Михайлов, **Р.М. Грубка**, М.Г. Петров // Научно-технические аспекты в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2015. – № 7 (49). – С. 30–39.

7. **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.

8. **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. - Вып. 1 (60). - С. 19 - 24.

9. **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 сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2018. - Вып. 2 (61). - С. 15 - 22.

10. **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: Донец. нац. техн. ун-т, 2018. - Вып. 3(62). - С. 10 - 18.

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

12. **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. - Тула: ТулГУ, 2018. - Вып. 4. - С. 262 - 271.

13. **Грубка, Р. М.** Развитие кинематического метода синтеза профиля зубьев применительно к пространственному зубчатому соединению цилиндрических зубчатых колес [Текст] / **Р. М. Грубка**// Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. - Алчевск: Донбас. гос. техн. ун-т, 2018. — Вып. 54. — С. 127 – 132.

14. **Грубка, Р. М.** Аппроксимация координат точек профиля зубьев червячных фрез в нормальном сечении сплайнами Безье [Текст] / **Р. М. Грубка**// Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. – Луганск: ЛНУ им. В. Даля, 2018. - Вып. 2 (23). - С. 62 - 69.

15. **Грубка Р.М.** Конструктивные способы повышения эксплуатационных показателей цилиндрических зубчатых передач [Текст] / **Р.М. Грубка**// Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. - Донецк: Донец. нац. техн. ун-т, 2019. - Вып. 1(64). - С. 17 - 22.

16. **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: Донец. нац. техн. ун-т, 2019. - Вып. 3(66). - С. 16 - 21.

17. **Грубка, Р.М.** Фрезерование зубьев втулок зубчатых муфт с пространственной геометрией / **Р.М. Грубка**, В.В. Польшченко // Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения (ТМ - 2011) [Текст] + [Электронный ресурс]: Сб. тр. 3-й междунар. Науч.-техн. конф., г. Брянск, 19-20 мая 2011 г./ Под общ. Ред.. А.Г. Суслова. – Брянск: Десяточка, 2011. – С. 38 – 39.

18. **Грубка, Р.М.** Устройство для чистовой обработки зубьев втулок зубчатых муфт с пространственной геометрией [Текст] / **Р.М. Грубка**, А.Н. Михайлов, А.Ю. Шадиев // «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы»: Материалы двенадцатого международного научно-практического семинара, г. Донецк, 12-14 апреля 2011 г. В 2-х томах. Т.2. - Донецк: ДонНТУ, 2011. - С. 200-204.

19. **Grubka Roman** Setting parameters of gear-hobbing machine by processing of teeth of hub of gear clutch with spatial geometry [Текст] / **Roman Grubka**, Alexandr Mikhailov, Irina Petruaeva, Olga Kulbida // ModTech International Conference 24-26th May 2012, Vadul lui Voda: Chisinau, 2012. P. 425-428 (Index to Scientific & Technical Proceedings of Thomson Scientific - Institute for Scientific Information (ISI). All the papers are available at ISI Web of Science).

20. **Грубка, Р.М.** Экспериментальное получение зубьев втулок зубчатых муфт с геометрией приближенной к групповой пространственной на существующем серийном оборудовании [Текст] / **Р.М. Грубка**, А.Н. Михайлов, И.А. Петряева, Х.А. Каюмов // Известия ТТИ ЮФУ–ДонНТУ. Материалы Тринадцатого Международного научно-практического семинара «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы». В 3-х кн. – Таганрог. Изд-во ТТИ ЮФУ. Кн. 3. 2012, № 12. – С. 80-86.

21. **Грубка, Р.М.** Определение распределения напряжений в зубчатой муфте между зубьями с прямолинейной образующей при наличии погрешностей монтажа валов [Текст] / **Р.М. Грубка**, Е.С. Тарасова, Х.А. Каюмов // «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы»: Материалы Четырнадцатого международного научно-практического семинара, г. Донецк, 15-18 апреля 2013 г. В 3-х т. Т.3. - Донецк, ДонНТУ, 2013. – С.81-85.

22. **Грубка, Р.М.** Классификация конструктивных элементов зубчатой втулки, способствующих равномерному распределению нагрузки и повышению несущей и компенсирующей способности зубчатых муфт [Текст] / **Р.М. Грубка**, Х.А. Каюмов, Е.С. Тарасова // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов XX между. науч.-тех. конф. в г. Севастополе 16 – 21 сентября 2013 г. В 3-х т. – Донецк: ДонНТУ, 2013. Т.1. - С. 172-175.

23. **Грубка, Р.М.** Исследования напряжений в зубчатой втулке с зубьями с продольной модификацией при наличии погрешностей монтажа валов [Текст] / **Р.М. Грубка**, Е.С. Тарасова// Материалы Пятнадцатой международной научно-практической конференции «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы». В 3-х кн. - Таганрог, Изд-во ЮФУ. Кн. 3, 2014, № 14. – С.56-61.

24. **Грубка, Р.М.** Классификация конструктивных элементов обоймы, способствующих равномерному распределению нагрузки и повышению несущей

и компенсирующей способности зубчатых муфт [Текст] / **Р.М. Грубка**, Е.С. Тарасова // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов XXI межд. науч.-тех. конф. в г. Севастополе 15 – 20 сентября 2014 г. - Донецк: МСМ, 2014. –С. 58-61.

25. Рапацкий, Е.В. Имитационное моделирование напряженно-деформированного состояния втулок зубчатых муфт [Текст] / Е.В. Рапацкий, **Р.М. Грубка**, А.Н. Михайлов // Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-18 сентября 2016 г. – Донецк: МСМ, 2016. Т. 2. – С. 114-116.

26. Rapatskii E.V. Imitation modeling of the stress-strain state of the gear coupling sleeves [Текст] / E.V. Rapatskii, **R.M. Grubka**, A.N. Mikhailov, O.V. Sokolova// International Journal of Innovative and Information Manufacturing Technologies No.4, (2017). - P. 42–44.

27. **Грубка, Р. М.** Определение суммарных погрешностей, возникающих в процессе эксплуатации зубчатых муфт [Текст] / **Р. М. Грубка**, А. Н. Михайлов, И. А. Петряева // Комплексные проблемы техносферной безопасности: материалы Междунар. науч.-практ. конф. - Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, 26-28 октября 2017 г. - Ч. V. - С. 181- 185.

28. **Грубка, Р. М.** Алгоритм синтеза пространственных геометрий зубьев цилиндрических колес, работающих при наличии погрешностей и деформаций элементов передач [Текст] / **Р. М. Грубка**, А. П. Недашковский, А. Н. Михайлов, И.А. Петряева, А. А. Байчоров // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов XXV межд. науч.-тех. конф. в г. Севастополе 10 – 16 сентября 2018 г. В 2-х т. – Донецк: ДонНТУ, 2018. Т.1. - С. 113-118.

29. **Грубка, Р. М.** Классификация суммарных погрешностей, возникающих при изготовлении, монтаже и эксплуатации зубчатых венцов цилиндрических зубчатых колес [Текст] / **Р. М. Грубка**, А. Н. Михайлов, И. А. Петряева // Труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности» - Таганрог: ПИ ДГТУ, 2018. - С. 20- 26.

30. **Грубка, Р.М.** Классификация технологических способов формообразования зубьев цилиндрических колес с продольной модификацией / **Р.М. Грубка**, А.Н. Михайлов, И.А. Петряева // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий [Электронный ресурс] : сб. тр. научного семинара, посвященного памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, почетного профессора ДГТУ А.П. Бабичева / отв. ред. В.А. Лебедев ; Донской гос. техн. ун-т. – Электрон. текстовые дан. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2019. – С. 240 - 246 – URL:<https://ntb.donstu.ru/content/2019616>. – ЭБС ДГТУ. – Загл. с экрана. ISBN 978-5-7890-1657-2

31. **Грубка, Р.М.** Классификация видов профильной модификации зубьев цилиндрических колес [Текст] / **Р.М. Грубка**, А.Н. Михайлов, И.А. Петряева // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XVII международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады 04-05 апреля 2019 г. / Под общ. ред. Лагуновой Ю.А. / Оргкомитет: Ю.А.

Лагунова, А.Е. Калянов. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2019. – С. 321 - 324.

32. **Грубка, Р.М.** Классификация видов продольной модификации зубьев цилиндрических зубчатых колес в зависимости от функционального назначения [Текст] / **Р.М. Грубка**, А.Н. Михайлов, И.А. Петряева // Механики XXI века: материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Братск: Изд-во БрГУ, 2019. – С. 187 - 190.

33. **Грубка, Р.М.** Технологические способы формообразования зубьев с пространственной геометрией боковой поверхности [Текст] / **Р.М. Грубка**, А.Н. Михайлов, И.А. Петряева// Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. тр. науч. симпозиума технологов-машиностроителей / Донской гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2019. – С. 234 - 239.

Личный вклад автора в работах, опубликованных с соавторами: [1] - соискателем выполнены исследования отклонений геометрических параметров зубьев; [2, 19] - соискателем разработана методика расчета параметров для настройки зубофрезерного станка; [6] - соискателем выполнен анализ возможности применения функционально-ориентированных покрытий для повышения долговечности зубчатых колес; [7, 12] - соискателем выполнено составление и решение систем нелинейных уравнений для определения параметров сплайнов; [8, 27] - соискателем получены зависимости суммарных погрешностей; [9] - соискателем разработана методика синтеза соединения зубьев; [17]- соискателем выполнено описание технологических способов фрезерования зубьев; [18] - соискателем разработана принципиальная схема устройства; [20] - соискателем выполнена постановка эксперимента; [21, 23, 25, 26] - соискателем выполнена постановка задачи по расчету нагрузок; [22, 24, 29, 30, 32, 33] - соискателем разработаны классификаций; [28] - соискателем разработан алгоритма синтеза.