

**Заключение диссертационного совета Д 01.014.02 на базе
ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНЕЦКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики
по диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук**

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета Д 01.014.02 от 15.10.2020 г. протокол № 6

О ПРИСУЖДЕНИИ

**Грубке Роману Михайловичу
ученой степени доктора технических наук**

Диссертация «Теоретические основы повышения точности обработки цилиндрических колес путем ориентированной многокоординатной пространственной модификации зубьев» по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения (технические науки) принята к защите «03» февраля 2020 г. диссертационным советом Д 01.014.02 (протокол № 3), новая дата защиты назначена на основании решения диссертационного совета Д 01.014.02 (протокол №5/1 от 25.09.2020 г) на базе ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 (приказ о создании диссертационного совета № 778 от 10.11.2015 г., приказы об изменении состава диссертационного совета № 651 от 20.06.2017 г., № 1768 от 12.12.19 г., № 656 от 09.04.2020 г.)

Соискатель, Грубка Роман Михайлович, 1976 года рождения. В 1995 году окончил Донецкий политехнический техникум. В 2000 году окончил ГУВЗ «Донецкий государственный технический университет», получив квалификацию магистра по специальности «Технология машиностроения». С декабря 1999 г. по ноябрь 2000 г. работал инженером-конструктором на заводе ОАО «Радонмаш», г. Донецк. С декабря 2000 г. по ноябрь 2003 г. обучался в аспирантуре ГУВЗ «Донецкий государственный технический университет». С января 2004 г. по октябрь 2010 г. ассистент кафедры «Технология машиностроения» ГУВЗ «Донецкий национальный технический университет». В мае 2010 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. С ноября 2010 г. по январь 2015 г. доцент кафедры «Технология машиностроения» ГУВЗ «Донецкий национальный технический университет». С 5 марта 2015 г. по 5 марта 2018 г. обучался в докторантуре ГОУВПО «ДОННТУ». В настоящее время работает в должности доцента кафедры «Технология машиностроения» ГОУВПО «ДОННТУ».

Диссертация выполнена на кафедре «Технология машиностроения» ГОУВПО «ДОННТУ» Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики.

Научный консультант: Михайлов Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» ГОУВПО «ДОННТУ» (г. Донецк).

Официальные оппоненты:

1. БУТЕНКО ВИКТОР ИВАНОВИЧ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственной технической университет», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация;

2. ПЕТРЕШИН ДМИТРИЙ ИВАНОВИЧ, доктор технических наук, доцент, Директор УНТИ БГТУ, профессор кафедры «Автоматизированные технологические системы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Брянский государственный технический университет", г. Брянск, Российская Федерация;

3. СЕРГА ГЕОРГИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Начертательной геометрии и графики» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», г. Краснодар, Российская Федерация.

Официальные оппоненты дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – ГОУВПО «Донецкий институт железнодорожного транспорта» (ДОНИЖТ), г. Донецк. В положительном заключении ГОУВПО «Донецкий институт железнодорожного транспорта» (ДОНИЖТ), подписанном ректором института, доктором технических наук, профессором Чепцовым М.Н., указано, что диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу на актуальную тему, в которой решена важная научно-техническая проблема повышения точности многокоординатного фрезерования пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес, способных 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 режущего инструмента и траекторий относительного перемещения инструмента и заготовки в процессе формообразования.

Новые научные результаты, полученные диссертантом имеют существенное значение для фундаментальной науки и практики в области технологии машиностроения, а также для развития технологии производства и повышения точности элементов цилиндрических зубчатых передач с

пространственно-модифицированными зубьями. Выводы и рекомендации достаточно обоснованы.

В целом, диссертационная работа отвечает требованиям п. 2.1 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, соответствует специальности 05.02.08 – Технология машиностроения, а ее автор Грубка Роман Михайлович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Выбор официальных оппонентов обоснован тем, что они являются ведущими учеными в области технологии машиностроения и ведут исследования, которые близки тематике диссертации соискателя, а **выбор ведущей организации** обоснован направлением проводимой ее сотрудниками научной работы, наличием публикаций в соответствующей сфере исследований, а также способностью оценки научной и практической ценности диссертации.

Основные результаты диссертационной работы Грубки Р.М. полностью опубликованы в 34 научно-технических работах, из них: 13 статей в ведущих рецензируемых изданиях ВАК ДНР, имеющих РИНЦ; 3 статьи в ведущих рецензируемых журналах ВАК России, имеющих РИНЦ; 18 публикаций в материалах международных конференций, в том числе в сборниках, входящих в международные наукометрические базы данных.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Гитуни, А. Синтез структуры технологических процессов изготовления пространственно-модифицированных зубьев муфты в зависимости от условий перекося 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 // Научные технологии 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.

В опубликованных работах автору принадлежат основные идеи проведенных исследований и результаты экспериментов, выполненный анализ результатов исследований. Соискателем выполнены исследования отклонений геометрических параметров зубьев, разработана методика расчета параметров для настройки зубофрезерного станка; соискателем выполнено составление и решение систем нелинейных уравнений для определения параметров сплайнов, получены зависимости для определения суммарных погрешностей, разработана методика синтеза зацепления зубьев, выполнено описание технологических способов фрезерования зубьев, описана постановка эксперимента, выполнена постановка задачи по расчету нагрузок, разработаны классификации конструктивных элементов зубчатой втулки и обоймы, способствующих равномерному распределению нагрузки и повышению несущей и компенсирующей способности зубчатых муфт, классификация суммарных погрешностей, классификация технологических способов формообразования зубьев цилиндрических колес с продольной модификацией, классификация видов продольной модификации зубьев цилиндрических колес и разработан алгоритм синтеза пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес.

На автореферат поступило 11 отзывов. Все отзывы положительные. В них отмечается актуальность исследования, дана оценка основным результатам, указаны замечания, а также сделаны положительные заключения о соответствии работы требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

В отзывах содержатся следующие замечания:

1. Базров Борис Мухтарбекович доктор технических наук по специальности 05.02.08 - «Технология машиностроения», профессор, заведующий лабораторией теории модульной технологии ФГБУН ИМАШ им. А. А. Благонравова РАН, Российская Федерация, г. Москва. Замечания: 1) Из автореферата не понятно, погрешности и деформации элементов зубчатых передач систематизированы в рамках данного исследования или их необходимо

определять в каждом конкретном случае? 2) В автореферате не указаны параметры зубчатого венца (модуль и число зубьев) и для каких условий эксплуатации они рассчитывались. 3) В автореферате не указаны режимные параметры обработки, которые были использованы при нарезании зубчатых венцов в процессе выполнения экспериментальных исследований. Есть ли необходимость в корректировке режимов резания при нарезании пространственно-модифицированных зубчатых венцов?

2. Ямников Александр Сергеевич, доктор технических наук по специальности 05.02.08 – «Технология машиностроения», профессор кафедры «Технология машиностроения» Тульского государственного университета, Российская Федерация, г. Тула. Замечания: 1) Представляется недостаточной точность измерения, заявленная автором: «Точность измерения координат точек при уровне значимости 0,05: для координаты X - $\pm 0,010$ мм, для координаты Y - $\pm 0,068$ мм, для координаты Z - $\pm 0,012$ мм». 2) Не указана степень точности исследуемого колеса и достижимая степень точности по предложенному методу.

3. Блюменштейн Валерий Юрьевич, доктор технических наук по специальности 05.02.08 – «Технология машиностроения», профессор кафедры «Технология машиностроения» Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева, Российская Федерация, г. Кемерово. Замечания: 1) Целесообразно было бы развить классификацию (рис. 4) путем уточнения номенклатуры погрешностей изготовления, монтажа и деформаций элементов зубчатых передач. 2) В каком виде автор представил рекомендации для промышленных предприятий (готовые программы для расчетов, таблицы с режимами обработки, указания по настройке оборудования и пр.)? 3) Выравнивание сечения среза не всегда будет приводить к повышению стабильности процесса обработки, при этом надо учитывать и направление результирующей силы резания.

4. Козлов Александр Михайлович, доктор технических наук по специальности 05.02.08 – «Технология машиностроения», заведующий кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Российская Федерация, г. Липецк. Замечания: 1) В литературном обзоре недостаточно внимания уделено работам ученых Тульской школы, общепризнанной в области зубообработки. 2) Из автореферата неясно, как полученные автором зависимости и алгоритмы расчета (например, рис. 23) реализуются при обработке зубчатых колес на стандартном универсальном оборудовании (без ЧПУ) - рис. 24. 3) В практической значимости п. 1 следовало указать значения отклонений координат по толщине зуба при обработке пальцевой модульной фрезой. 4) Из автореферата (стр. 29-30) не понятно началом координат какой из систем являются координаты $x_{н.к.}$ и $u_{н.к.}$ целесообразно было показать положение этого начала координат на одном из рисунков. 5) В работе целесообразно было рассмотреть вопрос определения геометрических параметров слоев, срезаемых зубьями червячной фрезы при ее перемещении в относительном движении по пространственной траектории.

5. Смоленцев Евгений Владиславович, доктор технических наук по специальности 05.02.08 – «Технология машиностроения», заместитель заведующего кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Российская Федерация, г. Воронеж. Замечания: 1) В автореферате не приведены зависимости для определения коэффициентов Ax_i , Ay_i , Az_i зависящих от величин углов поворота $\varphi_{x\Sigma}$, $\varphi_{y\Sigma}$ и перемещений Δx_Σ , Δy_Σ , Δz_Σ (стр. 12). 2) Из автореферата не понятно как определяется рациональное значение радиальной и тангенциальной коррекций положения режущего инструмента. 3) Из автореферата не понятно, сколько было параллельных измерений в каждой точке профиля зуба и как эти параллельные измерения осуществлялись.

6. Федоров Владимир Павлович, доктор технических наук по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения, профессор кафедры «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», Российская Федерация, г. Брянск. Замечания: 1) В автореферате не приведены зависимости для определения коэффициентов m'_{ij} в определителе матрицы перехода от системы координат $S(X, Y, Z)$ к системе координат $S_I(x_I, y_I, z_I)$. 2) Классификацию суммарных погрешностей цилиндрических зубчатых колес рис. 4, с целью повышения практической ценности ее использования для исследования реальных механизмов, целесообразно развить указанием составляющих суммарных погрешностей. 3) В автореферате следовало бы более детально пояснить методику выполнения экспериментальных исследований по определению геометрических параметров пространственно-модифицированных зубьев.

7. Кравченко Павел Давидович, доктор технических наук по специальности 05.04.11 – «Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной промышленности», профессор кафедры «Машиностроение и прикладная механика», Волгодонского инженерно-технического института – филиала НИЯУ «МИФИ», Российская Федерация, г. Волгодонск. Замечания: 1) Недостаточный уровень обоснования изменения длины общей нормали при модифицировании зубьев. 2) Пункты 9-12 заключения можно значительно сократить без ущерба для содержания.

8. Куц Вадим Васильевич, доктор технических наук по специальности 05.02.07 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки», доцент, профессор кафедры «Машиностроительных технологий и оборудования» ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Российская Федерация, г. Курск. Замечания: 1) В шестой главе автор показывает метод расчета параметров срезаемого слоя при многокоординатном зубофрезеровании методом копирования, однако из автореферата не понятен полный перечень геометрических параметров срезаемого слоя, который может быть рассчитывается с помощью данного метода. 2) В работе не указано, какой степени точности зубчатых передач (колес) удалось достичь с применением полученных научных и практических результатов, была ли она повышена?

9. Корнеев Сергей Васильевич, доктор технических наук по

специальности 05.05.06 – «Горные машины», профессор, заведующий кафедрой Горной энергомеханики и оборудования, ГОУВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет», Луганская Народная Республика, г. Алчевск. Замечания: 1) В автореферате не представлена информация об оценке возможностей повышения надежности, долговечности и нагрузочной способности зубчатых колес на базе разработанного ФОКТП (второй раздел). 2) В автореферате отмечается, что разработана методология проектирования пространственно-модифицированных зубчатых венцов цилиндрических колес, целесообразно было привести ее более подробное описание. 3) В автореферате не приведено, как определяются суммарные погрешности зубчатой передачи: углы перекосов и перемещения.

10. Кыткин Владимир Петрович, директор Государственного предприятия «Проектно-конструкторский технологический институт», Донецкая Народная Республика, г. Донецк. Замечания: 1) В автореферате недостаточно четко описаны условия экспериментального получения зубчатых венцов с комплексной пространственной модификацией зубьев (характеристики инструмента, режимы резания). 2) Из автореферата не понятно были ли реализованы алгоритмы, представленные на рис. 21 - 23, в виде доступных для использования на производстве программ.

11. Семенов Александр Николаевич, доктор технических наук по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения, профессор, декан Авиатехнологического факультета Рыбинского государственного авиационного университета им. П.А. Соловьева, Российская Федерация, г. Рыбинск. Замечания: 1) Из автореферата не понятно как определяется угол смещения эвольвенты в полюс зацепления ϕ_{c_2p} . 2) Неясно, как построены графики, представленные на рис. 14, 15, 16, 17. Если рассчитывались отдельные точки, то какими линиями они соединены? Если линии строились по аналитическим зависимостям, то откуда взялись точки? Какое количество экспериментов проводилось для повышения достоверности? 3) В автореферате не представлены результаты экспериментов по проверке точности нарезания зубчатых колес дисковой и пальцевой фрезами методом копирования.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований по специальности 05.02.08:

проведен:

анализ систем синтеза зацеплений и оптимизации конструкции цилиндрических зубчатых колес и передач, в результате чего 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. Анализ известных конструктивных и технологических подходов по повышению нагрузочной и компенсирующей способности цилиндрических зубчатых колес показал, что эти методы не позволяют создавать универсальные

конструкции зубчатых передач, способных компенсировать все негативные эксплуатационные факторы.

разработаны:

- методики аналитического определения координат точек пространственной траектории относительного перемещения режущих инструментов, работающих по методу копирования и обкатки, в зависимости от геометрии боковой поверхности зубьев и геометрии режущей кромки инструмента;
- методика определения параметров срезаемого слоя при многокоординатном зубофрезеровании методом копирования, основанная на пространственном подходе к решению задачи формообразования.

предложены:

- пространственный подход к решению задач формообразования зубьев цилиндрических колес при зубофрезеровании методом копирования и методом обкатки, позволяющий повысить геометрическую точность пространственно-модифицированных зубьев;

- методология синтеза внешнего и внутреннего зацеплений цилиндрических зубчатых колес, способных компенсировать комплексное действие погрешностей и деформаций элементов зубчатых передач, возникающих в процессе их эксплуатации.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

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

- предложено развитие кинематического метода синтеза пространственных зацеплений цилиндрических зубчатых колес, компенсирующих комплексное действие погрешностей и деформаций элементов зубчатых передач, за счет обеспечения линейного или близкого к линейному контакта между зубьями;

- разработаны элементы технологического обеспечения ФОКТП изготовления пространственно-модифицированных зубчатых венцов цилиндрических колес при многокоординатном зубофрезеровании, как для метода копирования, так и для метода обкатки;

- установлены закономерности процесса формообразования, позволяющие повысить геометрическую точность нарезания пространственно-модифицированных зубьев;

- 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;

- впервые 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;

- классифицированы по конструктивным и технологическим признакам виды модификаций элементов зубчатых венцов и способы формообразования модифицированных зубьев цилиндрических колес.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- 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 непрерывным 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 максимальное $\pm 9,3\%$; в пределах активной боковой поверхности зубьев - $\pm 6,3\%$.

- реализация на практике разработанного ФОКТП повышения надежности, долговечности и нагрузочной способности цилиндрических зубчатых передач, позволит осуществлять как сквозное, так и итерационное проектирование цилиндрических зубчатых колес с пространственно-модифицированными зубьями, способных компенсировать комплекс погрешностей и деформаций элементов передач;

- представленные рекомендации по синтезу внешнего и внутреннего пространственных зацеплений цилиндрических колес, компенсирующих комплекс погрешностей и деформаций элементов зубчатых передач позволяют повысить эксплуатационные характеристики цилиндрических передач за счет обеспечения линейного контакта зубьев и исключения кромочного контакта;

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

- представленные 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.

- предложены рекомендации по определению параметров для настройки зубофрезерных станков, позволяющие выполнять нарезание пространственно-модифицированных зубьев на существующем серийном оборудовании стандартным РИ.

- предложены рекомендации по контролю геометрических параметров пространственно-модифицированных зубчатых венцов, позволяющие автоматизировать обработку результатов измерений, с учетом непрерывного

изменения толщины зубьев в зависимости от координаты по их высоте и длине, с применением цифровой измерительной техники;

- разработаны алгоритмы назначения режимных параметров обработки пространственно-модифицированных зубьев методом копирования, позволяющие снизить трудоемкость расчетных операций;

- 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).

Оценка достоверности результатов исследования. Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов подтверждается корректностью использования апробированных методов исследований и научных теорий, адекватностью разработанных моделей, применением современного математического аппарата, приборов и технологического оборудования, достаточной сходимостью теоретических и экспериментальных исследований, эффективностью внедрения результатов работы в производство. Полученные соискателем научные результаты в полной мере освещены в публикациях в профессиональных изданиях и обсуждены на различных научно-технических конференциях.

Основные научные результаты диссертации получены соискателем лично. Основные идеи исследований принадлежат автору диссертации. Личный вклад соискателя состоит в формулировке цели и задач исследования, получении и анализе результатов исследования и обосновании закономерностей, полученных в работе. Лично соискателем разработан функционально-ориентированный конструкторско-технологический подход (ФОКТП) повышения надежности, долговечности и нагрузочной способности цилиндрических зубчатых передач; предложена методология синтеза внешнего и внутреннего зацеплений цилиндрических колес, способных компенсировать комплексное действие погрешностей и деформаций элементов зубчатых передач; предложен пространственный подход к решению задач формообразования зубьев цилиндрических колес при зубофрезеровании методами копирования и обкатки; разработана методика аналитического определения координат точек пространственной траектории относительного перемещения РИ; разработана методика определения параметров срезаемого слоя при многокоординатном зубофрезеровании методом копирования; в результате развития кинематического метода синтеза пространственных зацеплений цилиндрических зубчатых колес, обоснована возможность компенсировать комплексное действие погрешностей и деформаций элементов зубчатых передач; разработаны элементы технологического обеспечения ФОКТП изготовления пространственно-модифицированных зубчатых венцов цилиндрических колес при многокоординатном зубофрезеровании методами

копирования и обкатки; установлены закономерности процесса формообразования, позволяющие повысить геометрическую точность нарезания пространственно-модифицированных зубьев; выполнены экспериментальные исследования, обобщение результатов и формулировка выводов, а также внедрение результатов работы.

На основании изложенного, представленная диссертационная работа Грубки Романа Михайловича «Теоретические основы повышения точности обработки цилиндрических колес путем ориентированной многокоординатной пространственной модификации зубьев» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой получены новые решения актуальной научно-технической проблемы, имеющей важное народно-хозяйственное значение, заключающейся в повышении точности многокоординатного фрезерования пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес, способных 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.

По своей актуальности, научной новизне, теоретическому и практическому значению диссертационная работа отвечает требованиям п. 2.1 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, соответствует специальности 05.02.08 – Технология машиностроения.

На заседании от «15» октября 2020 г. диссертационный совет принял решение: присудить Грубке Р.М. ученую степень доктора технических наук по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения.

При проведении открытого голосования членов диссертационного совета, состоящего из 19 человек, из которых 16 докторов наук, участвовавших в голосовании, проголосовали: за 16, против 0, воздержавшихся 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета Д 01.014.02
д-р техн. наук, профессор



(подпись)

В.В. Гусев

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.014.02
д-р техн. наук, профессор

(подпись)

С.П. Еронько

15 октября 2020 г.