

На правах рукописи



СТЕБЛЕЦОВ ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ  
ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПЕРЕДАЧИ НОВИКОВА**

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической  
и физико-технической обработки

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Орел 2013

Работа выполнена на кафедре «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор  
Тарапанов Александр Сергеевич

Официальные оппоненты

доктор технических наук, профессор,  
Комаров Владимир Алексеевич  
ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет приборостроения и информатики»

профессор кафедры «Теплофизические приборы и аппараты»

кандидат технических наук, доцент,

Чевычелов Сергей Александрович

ФГБОУ ВПО «Юго-западный государственный университет»

доцент кафедры «Машиностроительных технологий и оборудования»

Ведущая организация

ФГБОУ ВПО «Брянский государственный технический университет»

Защита диссертации состоится «6» декабря 2013 г. в «09<sup>00</sup>» часов в ауд. 212 на заседании диссертационного совета Д 212.182.06 по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, главный корпус, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» (302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29).

Автореферат разослан «5» ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Василенко Юрий Валерьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы.**

С середины 20-го века внедрение зубчатого зацепления Новикова как альтернативы эвольвентному зацеплению носило революционный характер, сопровождалось всплеском масштабных исследований и крупными инвестициями, многоплановыми отраслевыми проектами и показательными примерами промышленной реализации. Самым весомым достоинством зацепления считается необычайно большой запас по контактной прочности зубьев и, как следствие, высокая конструктивная гибкость. Это открыло перспективы широкого распространения зацепления, начиная от высоконапряженных передач большой мощности в транспортной технике (в самолетах, кораблях, электровозах, автомобилях, танках и пр.) и кончая недорогими передачами для сельскохозяйственных машин. Передачи Новикова нашли свое заслуженное применение в условиях переменной нагрузки на привод. Несмотря на усилия нескольких поколений коллективов проектных и производственных организаций, многих научных школ России и других индустриальных стран, зацепление Новикова не стало полной альтернативой эвольвентному зацеплению, но нашло свою завоеванную нишу применения.

Вместе с тем следует отметить, что в широко доступной справочной литературе отсутствуют рекомендации по режимам обработки зубчатых колес передачи Новикова. Приходится проводить трудоемкие и дорогостоящие исследования по определению режимов резания, степени их влияния на точность и шероховатость поверхности.

Стремление к постоянному росту производительности труда, повышению точности и качества номинальной поверхности зубьев, предопределяет системное исследование кинематических и силовых характеристик процесса зубофрезерования.

Решение данной задачи возможно при комплексном анализе параметров впадины зуба, физико-механических свойств инструментального материала и материала заготовки, геометрических параметров инструмента и заготовки, кинематических и динамических характеристик процессов обработки. Это позволит сделать адекватный выбор метода обработки и сочетания режимов резания, обеспечивающих получение требуемых показателей качества и максимальной производительности процесса.

**Цель и задачи работы.** Повышение производительности и управление качеством (точностью и шероховатостью) зубофрезерования колес передачи Новикова с двумя линиями зацепления на основе комплексного анализа геометрических, кинематических и силовых параметров процесса.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие **задачи**:

- разработать математическую модель процесса зубофрезерования колес передачи Новикова, позволяющую определить положение точек режущего лезвия инструмента в пространстве, прогнозировать составляющие силы резания, точность и шероховатость;
- провести экспериментальное исследование влияния режимов обработки на составляющие силы резания, износ инструмента и качество зубчатых колес;

- разработать научно-обоснованные рекомендации, направленные на повышение производительности процесса обработки зубчатых колес.

**Объект исследования:** процесс зубофрезерования зубчатых колес передачи Новикова.

**Предмет исследования:** производительность и качество обработки зубчатых колес передачи Новикова.

**Методика исследований.** Теоретические исследования базируются на положениях теории резания металлов, проектирования режущего инструмента, научных основ технологии машиностроения, дифференциальной геометрии, векторном анализе, инженерии поверхности.

Экспериментальные исследования проводились на действующем оборудовании в лабораториях кафедры КТОМП и в производственных условиях ООО «Редуктор» (г. Орел). Измерения производились в «Центральной измерительной лаборатории» ОАО «Промприбор» (г.Ливны) и в «Центральной измерительной лаборатории» ОАО «Мценский литейный завод» (г.Мценск). В основе экспериментальных исследований использованы методы многофакторного планирования экспериментов и математической статистики.

**Научная новизна.** Разработана универсальная математическая модель процесса зубофрезерования колес передачи Новикова с двумя линиями зацепления, червячными фрезами, позволяющая на основе комплексного анализа технологических параметров, параметров детали и инструмента, управлять точностью и шероховатостью номинальных поверхностей для любых исходных контуров червячных фрез.

**Автор защищает:**

- методику комплексного анализа параметров процесса зубофрезерования колес передачи Новикова и прогнозировании точности и шероховатости изделия, заключающуюся в анализе параметров процесса обработки и прогнозировании точности и шероховатости изделия;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований обработки зубчатых колес передачи Новикова;
- технологические рекомендации по назначению режимов зубофрезерования зубчатых колес передачи Новикова.

**Практическая значимость.**

- технологические рекомендации по назначению режимов зубофрезерования зубчатых колес передачи Новикова;

- сокращение сроков конструкторско-технологической подготовки производства зубчатых колес зацепления Новикова за счет прогнозирования качества и производительности обработки с использованием разработанной универсальной математической модели процесса.

**Теоретическая и методологическая основа исследований.** Диссертационное исследование проведено на основе научных трудов отечественных и зарубежных специалистов по проблемам эффективности обработки колес передачи Новикова, повышения

качества обработанной поверхности, математического моделирования процесса обработки. В исследовании были использованы научные основы технологии машиностроения и теории резания, учение об инженерии обработанной поверхности, основы дифференциальной геометрии, математический анализ, дискретная математика.

**Реализация результатов работы.** Результаты исследований апробированы и приняты к внедрению на ООО «Редуктор» (г. Орел), ЗАО «Дормаш» (г. Орел) при обработке зубчатых колес передачи Новикова (экономический эффект более 250 000 руб.).

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на международных и региональных научно-технических конференциях: «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» (г. Орел, 2010, 2011, 2012 г.); «Высокие технологии в машиностроении» (Самара, 2009 г.); «Научный потенциал Орловщины в модернизации промышленного комплекса малых городов России» (Орёл-Ливны, 2010 г.); на научных конференциях Орел ГТУ в 2010-2013.

**Диссертация выполнялась при поддержке** гранта администрации Орловской области №12-08-97605 р\_центр\_а «Разработка математических моделей вновь создаваемых и существующих прогрессивных процессов формирования сложных поверхностей деталей, основанных на многопараметрическом анализе нано-элементов пространства обработки».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, 7 из которых опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных ВАК для публикации трудов на соискание ученых степеней и 4 патента РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 172 страницах основного текста, содержит 64 рисунка и 3 таблицы. Состоит из введения, пяти глав, списка литературы, включающего 96 наименований, и приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, определены цель, задачи, объект, предмет и методы исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** приведены примеры промышленного использования и результаты эксплуатации цилиндрических передач Новикова. Рассмотрены особенности кинематики формообразования инструментами червячного типа и современные конструкции червячных фрез.

Многие ученые занимались вопросами геометрического расчета передач Новикова, влияния технологических и монтажных погрешностей, среди которых следует отметить Г.М. Васина, А.Ф. Водопьянова, В.М. Грибанова, М.Л. Ерихова, М.Я. Иткиса, В.И. Короткина, Ю.Ф. Коуба, Н.Н. Краснащечева, В.Н. Кудрявцева, Ф.Л. Литвина, Н.П. Онишеникова, А.В. Павленко, Е.Г. Росливкера, В.М. Турновского, Р.В. Федякина, Ю.Д. Харитонов, В.А. Чеснакова, А.С. Яковлева, и др.

Осуществлен анализ работ, посвященных обработке зубчатых поверхностей. Исследования в данной области в разное время проводили Я.И. Адам, М.Н. Бобков, Е.Н. Валиков, Л.А. Васин, В.А. Гавриленко, Г.В. Гусев, А.С. Калашников, С.Н. Калашников, И.А. Коган, В.А. Комаров, С.И. Лашнев, А.А. Маликов, А.Ф. Мухин, Г.Г. Овумян, С.С. Петрухин, А.А. Силич, Б.А. Тайц, А.С. Тарапанов, Ю.Н. Федоров, Н.Д. Феофилов, Г.А. Харламов, Ю.В. Цвис, М.И. Юликов, А.С. Ямников.

В первой главе представлены основные типы и тенденции развития передачи Новикова в современных машинах и механизмах, определена степень влияния различных параметров на такие показатели, как точность и качество зубчатого колеса, производительность обработки. Проведен анализ современных конструкций инструментов червячного типа, ориентированных на чистовое зубонарезание или на предварительную обработку колес передачи Новикова. Рассмотрены особенности кинематики формообразования при обработке зубчатых колес Новикова, современные кинематические схемы зубофрезерования зубчатых колес, включая станки с ЧПУ, позволяющие увеличить точность нарезаемых колес за счет оперативного введения коррекции по результатам измерения обработанной или обрабатываемой детали.

В рассмотренных работах причины линейного размерного износа и закономерность его увеличения в процессе резания исследованы в достаточной степени и даны практические рекомендации по его уменьшению, однако физические причины возникновения локального износа (лунки) на выходном режущем лезвии червячной фрезы, а также ее увеличение и смещение с увеличением скорости резания и сложности срезаемых слоев были изучены недостаточно полно.

Проанализировано состояние вопроса расчета составляющих силы резания в свете работ российских и зарубежных исследователей. Рассмотрены современные воззрения на влияние силы резания, ее составляющих и их изменения в процессе обработки на точность и шероховатость зубчатых колес, обрабатываемых червячными фрезами.

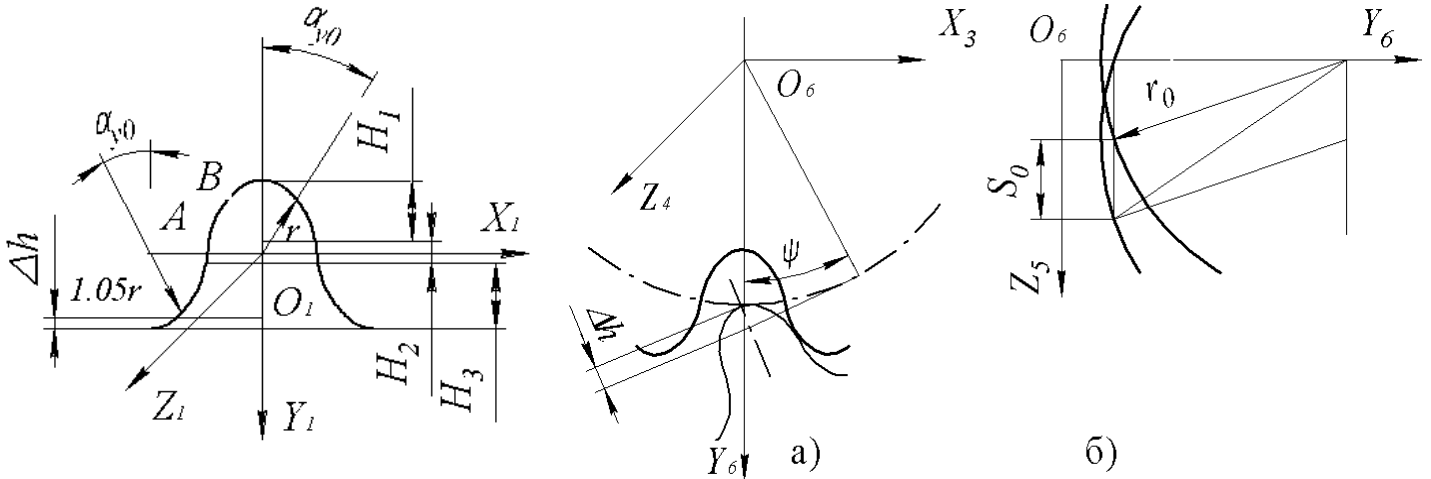
Определены основные направления по управлению параметрами точности и шероховатости зубофрезерования зубчатых колес. Поставлена цель работы и сформулированы задачи исследований.

Проведенный анализ литературных источников позволяет сделать вывод, что в настоящее время не существует обобщенной методики теоретической оценки зубонарезания, позволяющей производить исследование методов нарезания колес передачи Новикова на этапе разработки технологического процесса, а также при анализе новых способов зубофрезерования.

**Во второй главе** разработана универсальная методика комплексного анализа зубофрезерования зубчатых колес передачи Новикова, позволяющая прогнозировать и управлять основными параметрами процесса: силами резания, точностью и шероховатостью боковой поверхности зуба колеса, геометрической основой математической модели процесса резания колес передачи Новикова. При определении зависимостей, отображающих процесс формообразования, было сделано следующее допущение: заготовка непо-

движна, начало координат расположено в ее центре таким образом - ось  $OY$  совпадает с осью симметрии одной из впадин. При неподвижной заготовке все необходимые для формообразования впадины движения совершает инструмент. Обкат происходит по делительной окружности колеса без скольжения.

$$H_1 \begin{cases} X_1 = r \cdot \sin(\pm\alpha) \\ Y_1 = -r + \Delta h \\ Z_1 = 0 \end{cases} \quad H_2 \begin{cases} X_1 = \pm \Delta h \operatorname{tg}(\alpha) \\ Y_1 = 1,05r - H_3 - \Delta h \\ Z_1 = 0 \end{cases} \quad H_3 \begin{cases} X_1 = \pm 0,5\pi m + 1,05r \cdot \sin(\pm\alpha) \\ Y_1 = 1,05r - \Delta h \\ Z_1 = 0 \end{cases} \quad (1)$$



**Рисунок 1 - Задание исходного контура в плоскости  $XU$**

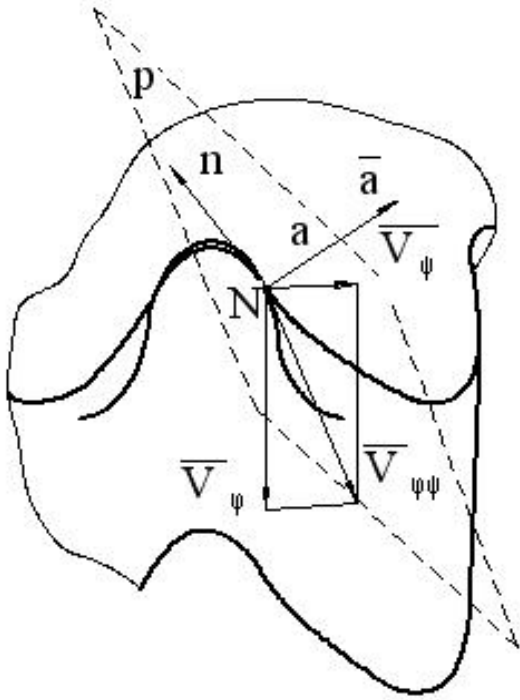
**Рисунок 2 - Схема расчета геометрической основы математической модели обработки зубчатых колес передачи инструментами червячного типа**

$$\begin{aligned}
 X &= r_1 \sin \psi - r_1 \psi \cos \psi + \left\{ X_1 \cos(\omega + \beta) + \right. \\
 &\quad \left. + [Z_1 \cos \gamma - (Y_1 - h_a) \sin \gamma] \sin(\omega + \beta) \right\} \cos \psi - \\
 &\quad - \left\{ [Z_1 \sin \gamma + (Y_1 - h_a) \cos \gamma + h_a - (a_\omega - r_1)] \cos \phi + \right. \\
 &\quad \left. + [-X_1 \sin(\omega + \beta) + (Z_1 \cos \gamma - (Y_1 - h_a) \sin \gamma) \cos(\omega + \beta)] \sin \phi + a_\omega - r_1 \right\} \sin \psi \\
 Y &= r_1 \cos \psi + r_1 \psi \sin \psi + \\
 &\quad + \left\{ X_1 \cos(\omega + \beta) + [Z_1 \cos \gamma - (Y_1 - h_a) \sin \gamma] \sin(\omega + \beta) \right\} \sin \psi + \\
 &\quad + \left\{ [Z_1 \sin \gamma + (Y_1 - h_a) \cos \gamma + h_a - (a_\omega - r_1)] \cos \phi + \right. \\
 &\quad \left. + [-X_1 \sin(\omega + \beta) + (Z_1 \cos \gamma - (Y_1 - h_a) \sin \gamma) \cos(\omega + \beta)] \sin \phi + a_\omega - r_1 \right\} \cos \psi \\
 Z &= -[Z_1 \sin \gamma + (Y_1 - h_a) \cos \gamma + h_a - (a_\omega - r_1)] \sin \phi + \\
 &\quad + [-X_1 \sin(\omega + \beta) + (Z_1 \cos \gamma - (Y_1 - h_a) \sin \gamma) \cos(\omega + \beta)] \cos \phi + S_0 \phi \quad (2)
 \end{aligned}$$

где,  $h_a$  – высота головки зуба;  $r_1$  – радиус делительной окружности зубчатого колеса;  $S_0$  – осевая подача;  $a_\omega$  – межосевое расстояние инструмента и обрабатываемого зуб-

чатого колеса;  $\beta$  – угол наклона зуба колеса;  $\gamma$  – передний угол инструмента;  $\omega$  – угол наклона винтовой поверхности инструмента.

Параметрами варьирования математического отображения являются:  $\psi$  (параметр подачи),  $\phi$  (параметр скорости) и  $\Delta h$  (параметр режущей кромки). Изменение  $\Delta h$  дает возможность воспроизвести контур режущих лезвий зуба инструмента (червячная фреза), изменение  $\psi$ ,  $\phi$  – перемещение этого контура в соответствии с особенностями кинематики зубофрезерования.



**Рисунок 3 - Схема определения толщины слоя, срезаемого при обработке инструментом червячного типа**

Пространственное представление геометрической основы математической модели схемы резания позволяет рассчитать траекторию любой точки режущей кромки в пространстве, а, следовательно, и определить кинематическое изменение углов резания и толщины срезаемых слоев.

Для определения кинематических параметров режущей кромки проведен векторный анализ пространственного математического отображения схемы резания.

$\bar{V}_\psi$  – вектор скорости (рисунок 3) перемещения в направлении движения подачи;

$\bar{V}_\phi$  – вектор скорости перемещения в направлении движения резания (рисунок 3);

Кинематическое изменение заднего угла определяется с помощью вектора скорости колеса  $\bar{V}_\psi$  и

вектора скорости инструмента  $\bar{V}_\phi$ : 
$$\Delta\alpha = \arctg \frac{\sqrt{X_\psi^2 + Y_\psi^2 + Z_\psi^2}}{\sqrt{X_\phi^2 + Y_\phi^2 + Z_\phi^2}}$$

Для вычисления толщины срезаемого слоя получено уравнение плоскости  $p$ , касательной к поверхности резания в точке  $N$ . Эта плоскость определяется тремя векторами:

$$\bar{V}_{\phi\psi} = \{X_{\psi\phi}; Y_{\psi\phi}; Z_{\psi\phi}\}, \bar{n} = \{X_n; Y_n; Z_n\}, \bar{z} = \{X_z; Y_z; Z_z\}$$

Вектор  $\bar{a}$ , в направлении которого измеряется толщина срезаемого слоя, должен быть перпендикулярен к плоскости  $p$  в точке  $N$ :

$$\bar{a} = \{X_a; Y_a; Z_a\}$$

Спроектировав на направление вектора  $\bar{a}$  вектор  $\bar{V}_\psi$ , получили толщину срезаемого

$$\text{слоя: } a = \left\{ \frac{X_a \cdot X_\psi + Y_a \cdot Y_\psi + Z_a \cdot Z_\psi}{\sqrt{X_a^2 + Y_a^2 + Z_a^2}} \right\}. \quad (3)$$



Предложенные формулы позволяют анализировать схемы резания при зубофрезеровании червячными фрезами зубчатых колес передачи Новикова. Определяемые по общей разработанной методике параметры могут быть рассчитаны для любого зуба инструмента в любой момент времени.

Конечной целью разработки универсальной математической модели является получение зависимостей, позволяющих рассчитать колебания составляющих силы резания в процессе всего времени обработки для различных конструкций инструмента, и определение погрешностей обработки, вызванные упругими деформациями технологической системы под воздействием переменной силы резания, доминирующей в суммарной погрешности обработки. В связи с этим возникла необходимость определения составляющих сил резания для любого момента времени и широкого диапазона модулей, чисел зубьев зубчатого колеса, конструктивных особенностей режущей части инструмента.

Получение необходимой аналитической информации в этом направлении связано с большими техническими трудностями, что обусловлено сложностью выделения той части силовой нагрузки, которая приходится на отдельный зуб червячной фрезы и на каждую кромку.

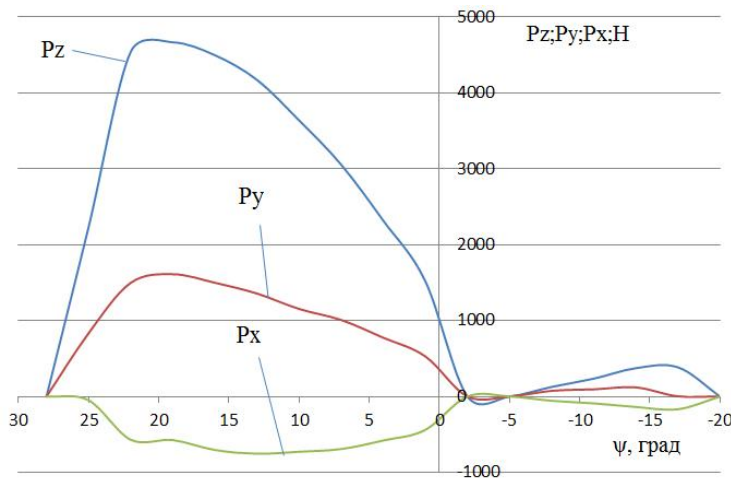
Методика расчета составляющих сил резания процесса зубофрезерования колес передачи Новика заключается в определении удельных сил на единицу длины режущего лезвия червячной фрезы и последующего суммирования по всем режущим кромкам, участвующим в резании. Для определения удельной силы резания  $\Delta P$  (Н/мм) применяются полученные экспериментально зависимости силы резания для диапазона толщин срезаемого слоя от 0,01 до 0,5 мм, передних углов – от -0,0175 рад до 0,0349 рад и задних углов – от  $0,873 \cdot 10^{-2}$  рад до 0,0524 рад, а также диапазона толщин срезаемых слоев от 0 до 0,01 мм. Такое разделение в определении удельных сил резания необходимо для учета процесса срезания или смятия слоя металла, удаляемого различными участками режущего лезвия. Суммируя удельные силы, возникающие на элементарном участке режущего лезвия, получили значения составляющих сил резания для всех режущих лезвий.

В качестве примера на рисунках 4 и 5 приведены результаты расчета изменений составляющих сил резания для одного зуба и суммарное изменение составляющих силы резания. Следует отметить, что составляющие силы резания зависят во многом от положения зуба инструмента относительно обрабатываемой заготовки.

На рисунках 4 и 5 видны значительные изменения величин  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$ , но т. к. жесткость технологической системы станка остается неизменной, то это вызывает колебания в зоне резания, которые приводят к увеличению отжатия колонны фрезерного станка на величину  $x$  на высоте  $H$ , отжатия шпинделя, суппорта, отправки изделия. Это, в свою очередь, приводит к понижению точности зубчатого венца, сказывается на стойкости инструмента.

Форма импульса силы резания оказывает значительное влияние на динамические деформации. Учет влияния силы резания на точность производится по величине упругих отклонений. При изготовлении зубьев по методу обката червячной фрезой под влиянием

составляющих силы резания происходят упругие отжатия оправок стола и суппорта и их изгиб.



**Рисунок 4 - Изменение составляющих сил резания для одного зуба**

$n_0 = 98$  об/мин;  $V = 30$  м/мин;  $S_0 = 3$  мм/об;  
 $z_0 = 10$ ;  $t = 3$  мм;  $z_1 = 30$ ;  $\beta = 16^\circ$

Предлагаемая методика определения радиального биения зубчатого венца позволяет прогнозировать параметры точности, выработать рекомендации при проектировании технологического процесса, например, при нарезании зубчатого колеса со следующими параметрами:  $t = 3$  мм,  $z_1 = 30$ , червячной фрезой со следующими режимами  $S_0 = 3,5$  мм/об,  $V = 30$  м/мин:  $f_a = 43$  мкм – для правого профиля,  $f_a = 68$  мкм – для левого профиля.

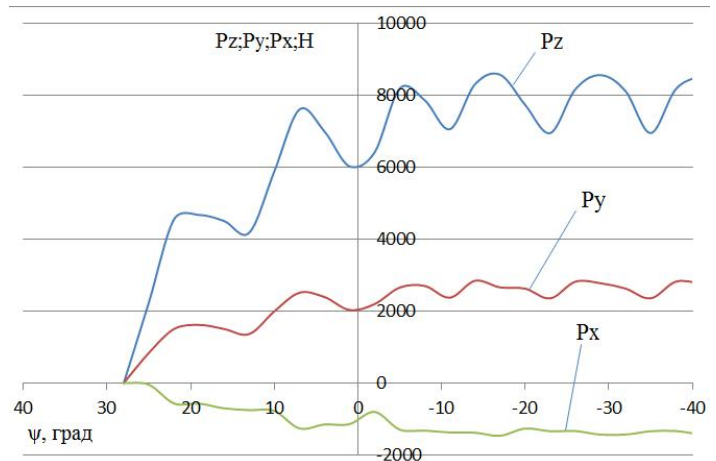
Данные отклонения межцентрового расстояния соответствуют зубчатым колесам, изготовленным по 10 степени точности (ГОСТ 1643-81, класс отклонений межосевого расстояния V, вид сопряжения B, межосевое расстояние  $a_w = 180 \div 250$  мм,  $f_a = \pm 100$  мкм).

Для повышения параметров точности зубчатого венца можно уменьшить подачу ( $S_0 = 2,5$  мм/об  $f_a = 26$  мкм – для правого профиля,  $f_a = 40$  мкм – для левого профиля – 8 степень точности), применить обработку в несколько проходов (происходит значительное снижение составляющих сил резания и, как следствие, – уменьшение деформации технологической системы).

Точность зубчатых колес в значительной степени зависит от колебаний, составляющих сил резания. Основные виды погрешностей, присущие зубофрезерованию зубчатых колес передачи Новикова (без учета погрешностей станка, приспособления):

- радиальное биение зубчатого колеса,
- колебания межосевого расстояния, вызываемое радиальным биением инструмента и периодическими колебаниями положения шпинделя (инструмента) и оси стола вследствие колебаний силы резания.

Выявлены зависимости между конструктивными, технологическими параметрами обработки и погрешностями обработанной поверхности, шероховатости, вследствие изменения составляющих сил резания при постоянной жесткости технологической си-



**Рисунок 5 - Суммарное изменение составляющих сил резания**

$n_0 = 98$  об/мин;  $V = 30$  м/мин;  $S_0 = 3$  мм/об;  $z_0 = 10$ ;  $t = 3$  мм;  $z_1 = 30$ ;  $\beta = 16^\circ$

стемы в направлении координатных осей при полном обороте зубчатого колеса, при обработке одного зуба и всех зубьев зубчатого колеса участвующих в резании.



**Рисунок 6 – Управление процессом обработки зубчатых колес передачи Новикова**

Математическая модель процесса формирования зубчатых колес зацепления Новикова представляет собой набор взаимосвязанных описаний, начиная с описания самого верхнего уровня системы и кончая подробным описанием деталей. В вершине такой структуры лежит контекстная диаграмма, отражающая связь системы с внешним миром. Диаграммы представляют собой декомпозицию контекстной диаграммы, детализирующие систему управления процессом обработки (рисунок 6).

На основании разработанной геометрической основы математической модели прогнозирования сил резания, точности и шероховатости был получен алгоритм для управления процессом нарезания зубьев колес передачи Новикова червячными фрезами. После ввода исходных данных (требуемая точность и шероховатость нарезаемого колеса, геометрия инструмента, материал инструмента, модель станка, а также величин лимитирующих параметров) на печать выводятся режимы нарезания зубьев и конструктивное исполнение инструмента, обеспечивающие наибольшую точность зубчатого колеса в пределах ограничивающих факторов. Практическая реализация приведенного алгоритма позволит улучшить степень точности и качество поверхности зубчатых колес при возможном снижении основного времени для существующего техпроцесса обработки, опре-

делить оптимальные значения входных параметров для нового технологического процесса обработки зубчатого колеса.

При обработке зубчатых колес Новикова (рисунки 7, 8) на производстве не применяются финишные операции шевингования и шлифования, а используют чистовые однозаходные червячные фрезы. Разработки специального чистового инструмента не нашли пока широкого распространения. Детальный анализ модели управления процессом обра-



*Рисунок 7 - Обработка зубчатого колеса передачи Новикова*

*Рисунок 8 - Зубчатое колесо передачи Новикова  $m=8$ ,  $z=56$ ,  $\beta=17^{\circ}0'0''$*

ботки, возможность введения неформообразующих лезвий в конструкцию инструмента, позволяют получить принципиально новые способы обработки и, соответственно, конструкции инструментов, что подтверждено патентами РФ.

Прогнозируемые инструменты позволят повысить производительность обработки за счет совмещения операций черновой, чистовой и упрочняющей обработки, сократить количество операций и число рабочих мест, улучшат качество и точность зубообработки введением игольчатых зубьев, расположенных вслед за черновыми зубьями с двойной режущей профильной кромкой.

Расчет и прогнозирование величины шероховатости обработанной поверхности производился в соответствии с положениями учения об инженерии поверхности, учитывал динамические и кинематические особенности процесса зубофрезерования зубчатых венцов. В качестве базовой модели использована модель Сулова А.Г.. Составляющие  $h_2$ ,  $h_3$  и  $h_4$  определялись по зависимостям, полученным автором теории для лезвийной обработки. При расчете составляющей шероховатости  $h_1$  были разработаны зависимости для зубчатых колес передачи Новикова.

На основе проведенных исследований установлено, что на величину шероховатости обработанной зубчатой поверхности основное влияние оказывают: профиль и высота обрабатываемого зуба, подача, геометрия инструмента, физико-механические свойства обрабатываемого материала.

**В третьей главе** приведена методика экспериментального исследования, позволяющая определить составляющие силы резания; выявить экспериментальные зависимости между ними и режимами обработки; определить жесткость станка по всем координатным осям; определить зависимость возникновения локальной лунки износа на выходной кромке червячной фрезы; исследовать зависимость между реальными погрешностями обработки и определенными теоретически; установить шероховатость поверхности зуба колеса передачи Новикова.

Исследования составляющих силы резания при зубофрезерофании колес передачи Новикова производилось с помощью универсального динамометра Мухина, персонального компьютера и среды LabView. Исследовано влияние осевой подачи, скорости резания, модуля на составляющие силы резания. Наибольшее влияние на силу резания в рассматриваемых интервалах изменения параметров оказывает осевая подача, что объясняется увеличением толщины слоя, срезаемого кромками зуба червячной фрезы.

Исследование точности зубчатых колес, изготовленных на рекомендуемых режимах, предложено определять с помощью современной координатно-измерительной машины Prismo 7. Использование данного оборудования позволило автоматизировать процесс проведения измерения и достигнуть высокой точности измерения.

**В четвертой главе** проведено экспериментальное исследование составляющих силы резания. Подтверждено их соответствие прогнозируемым силам. Разница между прогнозируемыми с помощью математической модели и экспериментальными силами резания не превышает 10%, что позволяет сделать вывод об адекватном применении прогнозируемых сил резания для расчета точностных параметров.

В процессе проведения эксперимента устанавливалось влияние различных параметров нарезания зубьев колеса на величину износа. В качестве параметров были выбраны - модуль, осевая подача, скорость резания, время обработки. Износ фрез Новикова меньше износа обычных модульных фрез в 1,2-1,5 раза. Это можно объяснить особенностями профиля, который состоит из отдельных радиусных и прямолинейных участков. Фреза Новикова позволяет снизить деформацию стружки заменой среза на более простые срезы, что приводит к значительному снижению износа режущих кромок инструмента.

При исследовании точности и шероховатости установлено, что точность изделий, изготовленных с рекомендуемыми режимами, соответствует требованиям чертежа и прогнозируемым значениям. Прогнозируемые значения шероховатости отличаются от полученных экспериментально на 7-12%.

**В пятой главе** даны рекомендации по выбору режимов резания для нарезания зубчатых колес передачи Новикова с двумя линиями зацепления. Приводятся поправочные коэффициенты, позволяющие учитывать механические свойства, химический состав и вид обработки.

Проведен расчет экономической эффективности основанный на сопоставлении обработки, осуществленной на режимах взятых из официальных справочников и режимах рекомендуемых по результатам исследования. Экономический эффект получаемый за

счет повышения производительности при сохранении качества, составил свыше 250тыс.руб. в год.

## **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

1. В представленной научно-квалификационной работе изложены технические и технологические решения, позволяющие на основе комплексного анализа геометрических, кинематических и силовых параметров зубофрезерования колес передачи Новикова с двумя линиями зацепления управлять процессом в целях повышения производительности процесса и обеспечения качества обработки, что вносит существенный вклад в развитие зубофрезерования неэвольвентных зубчатых колес.
2. Получены на основе векторного анализа геометрической основы математической модели процесса обработки зависимости изменения углов инструмента при обработке передачи Новикова червячной фрезой, параметры срезаемого слоя.
3. Получены зависимости изменения точностных параметров от составляющих сил резания и их колебаний в процессе обработки зубчатого колеса, предложены рекомендации по снижению динамических деформаций. Основными факторами, влияющими на величину шероховатости рабочих поверхностей зубчатого колеса передачи Новикова, являются величина подачи и число зубьев инструмента.
4. Экспериментально подтверждено, что при рекомендуемых режимах зубофрезерования обеспечивается повышение эффективности обработки. Разница между прогнозируемыми и экспериментальными значениями шероховатости и параметров точности не превышает 12%, что подтверждает адекватность теоретических результатов.
5. Разработаны практические рекомендации, направленные на повышение производительности процесса, за счет увеличения подачи (15%-20%) и скорости (10%) по сравнению с аналогичными эвольвентными колесами.
6. Прогнозируется, что по сравнению с зубофрезерованием стандартной червячной фрезой обработка предлагаемыми новыми инструментами позволит увеличить производительность, уменьшить шероховатость обработанной поверхности зубьев до  $Ra = 2,5$  мкм.
7. Произведена производственная апробация на предприятиях ООО «Редуктор» (г.Орел) и ЗАО «Дормаш» (г.Орел). Внедрен прогрессивный технологический процесс, включающий рекомендуемые режимы и позволяющий получить экономический эффект более 250 тыс. руб.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.**

### ***Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:***

1. **Стеблецов Ю.Н.** Износостойкость режущего инструмента при обработке зубчатых колес передачи Новикова [текст] / Ю.Н. Стеблецов, А.С. Тарапанов // *Фундаментальные*



и прикладные проблемы техники и технологии – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2011. – №4/3.С. 83-86.

2. **Стеблецов, Ю.Н.** Определение сил резания процесса нарезания зубчатых колес передачи Новикова червячными фрезами [текст] / Ю.Н. Стеблецов, А.С. Тарапанов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* – Орел: ОрелГТУ, 2010. – №5/2.с. 31-35.

3. **Стеблецов Ю.Н.** Определение шероховатости зубьев колес передачи Новикова с использованием математического отображения схемы резания [текст] / Ю.Н. Стеблецов, А.С. Тарапанов, В.Ю. Казаков // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2011. – №2/3.С. 36-40.

4. **Стеблецов, Ю.Н.** Прогнозирование параметров обработки зубчатых колес передачи Новикова с помощью математического моделирования [текст] // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* – Орел: ОрелГТУ, 2010. – №2/3.С. 83-86.

5. **Стеблецов Ю.Н.** Прогнозирование погрешности зубчатых колес передачи Новикова, вызванные деформацией технологической системы [текст] / Ю.Н. Стеблецов, А.С. Тарапанов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2011. – №2/2.С. 143-147.

6. **Стеблецов Ю.Н.** Экспериментальное исследование сил резания при обработке зубчатых колес передачи Новикова [текст] / Ю.Н. Стеблецов, А.С. Тарапанов, Михайлов Г.А. // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2011. – №6/2.С. 95-101.

7. **Стеблецов Ю.Н.** Экспериментальная адекватность результатов прогнозирования шероховатости обработки зубчатых колес передачи Новикова [текст] // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2012. – №6.С. 86.

#### *Список публикаций в других изданиях:*

8. **Стеблецов Ю.Н.** Качество поверхности зубчатых колес передачи Новикова [текст] / Ю.Н. Стеблецов, А.С. Тарапанов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – Технология* – 2011: Сборник научных трудов XIV международной научно-технической конференции / Технологический институт им. Н.Н. Поликарпова ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел, 5 – 7 октября 2011/ Под ред. А.В. Киричека и А.В. Морозовой. – Орел.: Издательство «Орлик», 2011. – С. 55 – 57.

9. **Стеблецов Ю.Н.** Контроль цилиндрических передач с зацеплением Новикова [текст] // *Научноёмкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении: Материалы IV Международной научно-технической конференции. В 2-х частях.* – Рыбинск: РГАТУ имени П.А. Соловьева, 2012. – Ч.1. – С.268.

10. **Стеблецов Ю.Н.** Перспективы исследования и повышения эффективности обработки зубчатых колес передачи Новикова [текст] / Ю.Н. Стеблецов, А.С. Тарапанов // *Материалы всероссийской научно-технической интернет конференции с международ-*

ным участием «Высокие технологии в машиностроении» – Самара: СамГТУ 2010. С. 72-74

11. **Стеблецов Ю.Н.** Повышение долговечности эксплуатации транспортных средств, с применением передачи Новикова [текст] / Ю.Н. Стеблецов, А.С. Тарапанов // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса» – Орел: Госуниверситет-УНПК 2011, С. 61-65.

12. **Стеблецов Ю.Н.** Повышение эффективности обработки зубчатых колес передачи Новикова // Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии [Текст]: Сборник научных трудов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию кафедры технологии машиностроения ЛГТУ. 17-19 мая 2012г. / под общ. ред. проф. А.М. Козлова. – Ч.2. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2012. – С. 3-7.

13. **Стеблецов Ю.Н.** Разработка математического отображения схемы резания зубчатых колес передачи Новикова червячными фрезами [текст] / Ю.Н. Стеблецов, А.С. Тарапанов // Материалы научно-практической конференции молодых ученых и аспирантов «Научный потенциал Орловщины в модернизации промышленного комплекса малых городов России» – Орел: Орел ГТУ 2010, с. 90-94.

14. **Стеблецов Ю.Н.** Шероховатость поверхности зубьев зубчатых колес передачи Новикова [текст] // Материалы 3<sup>ей</sup> международной научно-технической конференции «Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения (ТМ-2011)» – Брянск: Брянский ГТУ 2011, С. 228-229.

#### *Патенты РФ на изобретения:*

15. Патент РФ № 2457928 С1 «Способ упрочняющего зубофрезерования». Степанов Ю. С., Киричек А. В., Тарапанов А. С., **Стеблецов Ю. Н.**, Морин В. В., Афанасьев Б. И., Самойлов Н. Н. 27.08.2012.

16. Патент РФ № 2457085 С1 «Комбинированная сборная упрочняющая червячная фреза». Степанов Ю. С., Киричек А. В., Тарапанов А. С., **Стеблецов Ю. Н.**, Морин В. В., Афанасьев Б. И., Самойлов Н. Н. 27.08.2012.

17. Патент РФ № 2464132 С1 «Способ двухпроходного зубофрезерования с упрочнением». Степанов Ю. С., Киричек А. В., Тарапанов А. С., **Стеблецов Ю. Н.**, Морин В. В., Афанасьев Б. И., Самойлов Н. Н. 17.10.12.

18. Патент РФ № 2456137 С1 «Двухпроходная комбинированная сборная червячная фреза с упрочнением». Степанов Ю. С., Киричек А. В., Тарапанов А. С., **Стеблецов Ю. Н.**, Морин В. В., Афанасьев Б. И., Самойлов Н. Н. 27.08.2012.