На правах рукописи

Печенкин Михаил Владимирович

МНОГОКООРДИНАТНОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ ЗУБЬЕВ ГИПЕРБОЛОИДНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ДВОЙНОЙ КРИВИЗНЫ

Специальность 05.02.07 – "Технология и оборудование механической и физико-технической обработки" (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ульяновск 2016

Работа выполнена в ФБГОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» на кафедре «Технологии машиностроительных производств».

Научный руководитель: Лунев Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Трубачев Евгений Семенович, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», заведующий кафедрой «Конструкторско-технологическая подготовка машиностроительных производств».

Юрасов Сергей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент Набережночелнинского института ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», доцент кафедры «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет»

Защита состоится 9 июня 2016 г. в 14.00 ч. на заседании диссертационного совета Д 999.003.02 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет» по адресу: г. Ульяновск, ул. Энгельса, 3, первый корпус (почтовый адрес: 432700, ГСП, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ульяновского государственного технического университета, адрес сайта www.ulstu.ru.

Автореферат разослан «___» апреля 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Веткасов Николай Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие современной техники предъявляет непрерывно возрастающие требования к зубчатым передачам.

К существующим в настоящее время передачам со скрещивающимися осями относят: червячные, спироидные, гипоидные, винтовые цилиндрические и цилиндро-конические передачи.

В области передаточных чисел от 1 до 4 могут применяться винтовая цилиндрическая передача и цилиндро-коническая передача, однако они не подходят для применения в тяжелонагруженных приводах.

Рекомендуемый диапазон передаточных чисел червячной и спироидной передачи находится в диапазоне 20-60. При уменьшении передаточного отношения резко возрастает опасность подрезания и заострения зубьев колеса и поднутрения и заострения витков червяка, а также уменьшается коэффициент перекрытия.

В механизмах, где требуется передавать большой крутящий момент при передаточных отношениях менее 10, в качестве силовой широко применяют гипоидную передачу. При этом в тяжелонагруженных приводах со скрещивающимися осями контактные давления боковой поверхности зубьев составляют не менее 1500-2000 МПа, а в ряде случаев доходят до 4000 Мпа, что приводит к разрыву смазочной пленки, металлическому контакту трущихся поверхностей и огромным касательным напряжениям, превышающем предел, за которым наступает пластическое деформирование зубьев.

К вышеперечисленным зубчатым передачам на скрещивающихся осях можно отнести и гиперболоидную зубчатую передачу с зубьями двойной переменной кривизны, под которой автором понимается такая зубчатая передача, зубья которой образуются на заготовке вида однополостной гиперболоид вращения, при этом боковые поверхности зубьев меняют свою кривизну как по высоте, так и по длине зуба.

Известно, что для силовых зубчатых передач главным критерием работоспособности является способность передавать рабочие нагрузки. Потребность в передаче больших нагрузок при сохранении или снижении массы привода непрерывно возрастает.

Теоретические исследования зубчатых колес на основе однополостного гиперболоида вращения, выполненные учеными Казанского авиационного института в 1960-2000-х годах, показали, что теоретический коэффициент перекрытия гиперболоидной зубчатой передачи с зубьями двойной кривизны оказывается значительно большим любой применяемой в настоящее время зубчатой передачи в области передаточных чисел 1-6.

Из-за ограниченности формообразующих движений классических зубофрезерных станков формообразование гиперболоидных зубчатых колес с зубьями двойной кривизны предлагалось производить вдоль прямолинейной образующей однополостного гиперболоида. Однако, окружной модуль и шаг гиперболоидных зубчатых колес с зубьями двойной кривизны должны быть переменными по линии зуба, что делает такие зубчатые колеса неработоспособными либо требующими дополнительного снятия материала.

Технологические трудности изготовления таких зубчатых колес можно преодолеть только при многокоординатной обработке на станках с ЧПУ.

Таким образом, формообразование гиперболоидных зубчатых колес с зубьями двойной кривизны на многокоординатных станках с ЧПУ является актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является осуществление практического формообразования зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной переменной кривизны на многокоординатных станках с ЧПУ.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- получена математическая зависимость для определения пространственного положения образующей линии при формообразовании боковой поверхности зубьев и геометрическую модель гиперболоидного зубчатого колеса с зубьями двойной кривизны.
- разработана математическая модель формообразования зубьев на станке с ЧПУ с управлением ориентацией траектории фрезы и получить управляющую программу для изготовления гиперболоидного зубчатого колеса на пятикоординатном станке с ЧПУ.
- разработан способ предварительного формообразования зубьев гиперболоидной передачи модульными дисковыми и пальцевыми фрезами.
- разработан инструмент для профильной модификации зубьев зубчатых колес.
- получены математические зависимости для координат точек образующих линий зубьев дугами окружности и эллипса.

Научная новизна работы заключается:

- в математической модели управления ориентацией фрезы при формообразовании боковой поверхности зуба гиперболоидного зубчатого колеса двойной переменной кривизны на многокоординатных станках с ЧПУ;
- в разработанной математической зависимости определения положения образующей линии при формообразовании боковой поверхности зубьев.

Практическая ценность работы заключается:

- в управляющей программе пятикоординатного фрезерования зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной кривизны с использованием разработанной методики управления ориентацией фрезы.
- в способе предварительного фрезерования зубьев гиперболоидных зубчатых колес модульными дисковыми и пальцевыми фрезами и реализации его на многокоординатном станке с ЧПУ.
- в инструменте для профильной модификации зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной переменной кривизны.
- в математических зависимостях для определения координат образующих линий зубьев, выполненных дугой окружности и эллипса.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования проводились на основе положений технологии машиностроения, теории математического моделирования, теории зацепления.

Экспериментальные исследования проводились с использованием CAD/CAM системы Siemens NX, станков с ЧПУ DMTG CKE6150Z, Fanuc Robodrill α21-FI, Micron UCP 800 Duro.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая зависимость для расчета координат точек образующей линии, позволяющая создавать геометрические модели гиперболоидных зубчатых колес с зубьями двойной переменной кривизны.
- математическая модель кинематики многокоординатного формообразования фрезерованием зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной переменной кривизны, позволяющая осуществлять обработку зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной переменной кривизны как с использованием CAM-систем, так и при непосредственном ввода данных в станок с ЧПУ.

Степень достоверности результатов и апробация работы.

Основные положения диссертации были доложены и обсуждены на международных научных конференциях: Рабочие процессы и технология двигателей (Казань, 2005 г.), Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2009», Авиакосмические технологии и оборудование (г. Казань, 2014 г.), на заседании научно-технического совета ОАО «Зеленодольский завод имени А.М. Горького» в 2014 году.

В полном объеме диссертация докладывалась на расширенном заседании кафедры «Технологии машиностроительных производств» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева, расширенном заседании кафедр «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты» Ульяновского государственного технического университета.

Результаты диссертационного исследования внедрены и опробированы на ООО «АДЕМ-Центр, АО «Вакууммаш» и ПАО «Камаз». Изготовлены опытные образцы зубчатых колес.

Публикации, патенты и свидетельства.

По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 3 в изданиях из перечня ВАК РФ, получено 2 патента на изобретения и 1 патент на полезную модель.

Личный вклад автора. Все экспериментальные и теоретические результаты получены автором лично. Участие соавтора Абзалова А.Р. в двух научных статьях носило консультативный характер.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, библиографии (192 литературных источника) и приложений. Объем диссертации – 132 страницы. В тексте 40 рисунков и 4 таблицы.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» на кафедре технологии машиностроительных производств.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, дается ее общая характеристика, определяется научное и практическое значение решаемой задачи, а также приводятся научные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены конструктивные особенности зубчатых колес, вопросы формообразования сложнопрофильных поверхностей резанием, особенности формообразования боковых поверхностей зубьев зубчатых колес, технологические трудности формообразования зубчатых колес, нарезаемых на заготовках вида однополостной гиперболоид вращения, финишная обработка зубчатых колес с точки зрения ее применимости для обработки зубьев на однополостном гиперболоиде вращения.

Вопросы проектирования и производства зубчатой передачи на основе однополостного гиперболоида вращения рассмотрены в работах Матвеева Г.А., Витренко В.А., Витренко А.В., Грибанова В.М., Кириченко С.Г., Кириченко И.А., Воронцова Б.С., Борисова В.Д., Печенкина В.М. и других исследователей.

Из-за невозможности реализовать многокоординатную обработку зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной кривизны на классических фрезерных и зубофрезерных станках разрабатывались различные приспособления и способы для осуществления формообразующих движений, однако они удлиняли кинематические цепи станка, снижая точность изготавливаемых зубчатых колес. Кроме того, такие приспособления и способы обработки позволяли получать лишь постоянную ширину впадины зубчатого колеса на заготовке вида однополостной гиперболоид вращения, что приводило к возникновению интерферируемых нерабочих участков зуба, которые необходимо было удалять.

Попытки получения твердотельной геометрической модели зубчатых колес и инструмента на заготовках вида однополостной гиперболоид вращения для последующего решения задачи формообразования зубьев на станках с ЧПУ предпринимались в работах Воронцова Б.С., Витренко В.А., Витренко А.В., Кириченко С.Г., Кириченко И.А., Грибанова В.М. и других авторов. Практическая реализация таких зубчатых колес на станках с ЧПУ осуществлялась только для частных (приближенных) случаев. Таким образом, вопросы изготовления сложнопрофильных зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной кривизны на станках с ЧПУ исследованы недостаточно полно.

Вторая глава посвящена определению математических зависимостей для расчета координат точек образующей линии зубьев, получена геометрическая модель зубчатого колеса, получена математическая зависимость для расчета координат точек образующих линий, выполненных дугами окружности и эллипса.

В разделе 2.1 получены математические зависимости для расчета положения точек образующей линии при формообразовании боковой поверхности зуба гиперболоидного зубчатого колеса двойной кривизны. Для прямолинейной образующей линии, представляющей собой отрезок прямой линии рассмотрено движение двух крайних точек образующей линии при формообразовании боковой поверхности зуба зубчатого колеса.

Геометрическое формообразование зубчатых колес сопряженного зацепления выполним, используя известные по работам Литвина Ф.Л. и других исследователей подходы для пространственного преобразования образующей линии.

При формообразовании боковой поверхности зуба принимаем, что каждая из точек, принадлежащих образующей линии, участвует в двух движениях (рисунок 1) – вращении вокруг оси y_2 с постоянной угловой скоростью ω_2 (переносное движение) и движении по гиперболе вдоль y_2 с постоянной проекцией скорости на ось y_2 (относительное движение).

Начальные положения точек M_1 и M_2 (рисунок 2) задаются в сечении, нормальном к направлению боковой поверхности зуба и проходящем через межосевой перпендикуляр.

Для удобства отображения на рисунках 1 и 2 представлены половины делительных гиперболоидов.

Крайние точки образующей линии M_1 и M_2 (рисунок 2) соотносятся с участками гиперболоида: ножкой зуба колеса 1 - точка M_1 и областью вершины зуба колеса 1 – точка M_2. Каждая из точек движется в относительном движении по своей гиперболе.

Координаты точки M_1, совершающей сложное движение в параметрическом виде в подвижной системе координат, получены в виде следующего уравнения:

$$\begin{pmatrix} x_2(t) \\ y_2(t) \\ z_2(t) \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{M1} ch(t) \cos(\varphi_{M10} + \omega_2 t) \\ p_j b_{M1} sh(t) \\ a_{M1} ch(t) \sin(\varphi_{M10} + \omega_2 t) \\ t \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где φ_{M10} - начальное угловое положение точки M_1;

sh(t) и ch(t) - гиперболический синус и косинус соответственно;

a_{M1} – действительная и b_{M1} – мнимая полуоси гиперболы, проходящей через точку M_1;

ω_2 - угловая скорость вращения делительного гиперболоида 2 (рисунок 1);

t – параметр, при изменении которого образующая линия формирует боковую поверхность зуба;

p_j –винтовой параметр зубчатого колеса, рассчитываемый по формуле:

$$p_j = \frac{u^*}{\omega_i}, \quad (2)$$

где ω_i – угловая скорость винтового движения;

u^* – поступательная скорость винтового движения.

При передаточном отношении u=1 и угле скрещивания осей 90^0 винтовой параметр p_j=1.

Координаты точки образующей линии M_1 при переходе от подвижной системы координат $O_2x_2y_2z_2$ к неподвижной системе $O_1x_1y_1z_1$ для ортогональной зубчатой передачи и единичного передаточного отношения будут определяться из следующих соотношений:

$$x_1(t) = O_1O_2 \sin(\omega_1 t) - y_2 \cos(\omega_1 t) + z_2 \sin(\omega_1 t); \quad (3)$$

$$y_1(t) = O_1O_2 \cos(\omega_1 t) + y_2 \sin(\omega_1 t) + z_2 \cos(\omega_1 t);$$

$$z_1(t) = x_2(t) = a_{M1} ch(t) \cos(\varphi_{M0} + \omega_1 t),$$

где O_1O_2 (рисунок 1) – отрезок прямой, соединяющий центры гиперболоидов;
x_2, y_2, z_2 - координаты точки M_1 образующей линии в подвижной системе координат $O_2x_2y_2z_2$;
ω_1 - угловая скорость вращения делительного гиперболоида 1 (рисунок 1).

Для расчета координат точки M_2 образующей линии применен аналогичный подход.

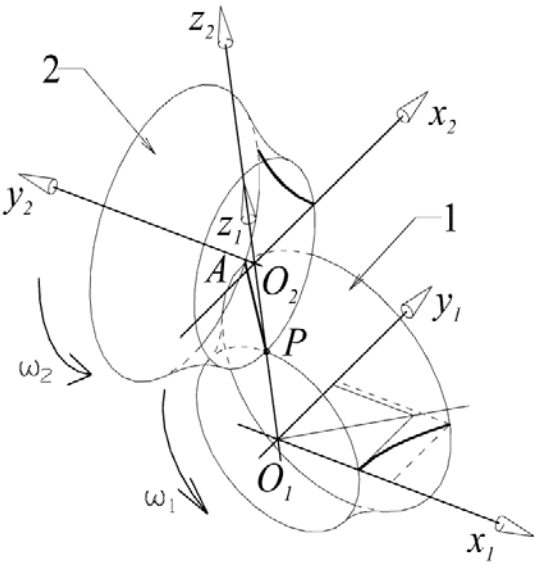

Рисунок 1. Делительные гиперболоиды:
1- гиперболоид формообразуемого колеса;
2- гиперболоид, с которым связана образующая линия;
ω_1,ω_2 – направление вращения гиперболоидов;
O_1O_2– отрезок прямой, соединяющий центры гиперболоидов

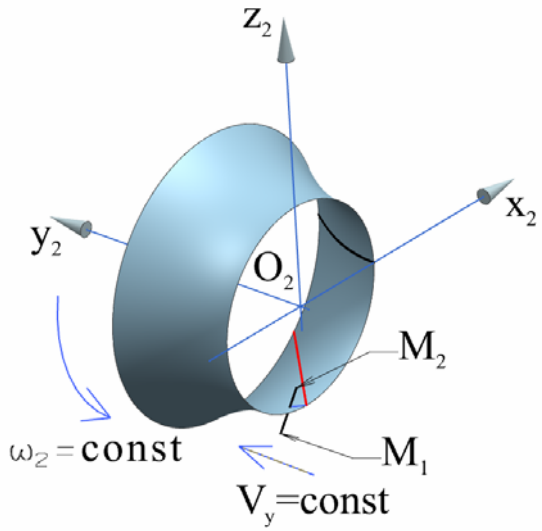

Рисунок 2. Схема к расчету движения образующей линии:
M_1-точка образующей линии, формирующей ножку зуба; M_2-точка образующей линии, формирующей головку зуба; V_y – скорость перемещения точек M_1 и M_2 вдоль оси y_2

Рассчитанные координаты точки образующей линии, соотносимой с линией ножки зуба, либо головки зуба при формообразовании боковой поверхности сформируют направляющую линию зуба.

В разделе 2.2 получены математические зависимости образующих линий в виде дуг окружностей и эллипса в нормальном сечении зуба, проходящем через межосевой перпендикуляр, используемых для профильной модификации зубьев.

Для образующей линии, выполненной в виде дуги окружности и применяемой при образовании боковой поверхности зуба первого колеса, получены следующие зависимости для расчета координат точек образующей линии:

$$\begin{aligned} X_{A_2B_2} &= -r_{w2} + R_2 \cdot \sin\alpha_n - \sqrt{R_2^2 - C^2}; \\ Y_{A_2B_2} &= -z_2 \cdot tg(\Sigma - \beta_{w2}); \\ Z_{A_2B_2} &= z_2, \end{aligned} \qquad (4)$$

где R_2 - радиус окружности, по которой описывается дуга образующей линии; Σ – угол скрещивания осей; β_{w2} - угол наклона зуба к оси второго зубчатого колеса на начальном гиперболоиде в нормальном сечении, проходящем через межосевой перпендикуляр; α_n - угол зацепления в нормальном сечении зуба, проходящем через межосевой перпендикуляр; r_{w2} – радиус окружности впадин второго колеса;

C – коэффициент; z_2 – координата точек образующей линии первого зубчатого колеса в системе координат второго зубчатого колеса.

Коэффициент *C* может быть определен из соотношений (рисунок 3):

$$C = S' + R_2 \cdot \cos \alpha_n - B, \quad (5)$$

где *B, S'* – коэффициенты (рисунок 3), определяемые по формулам:

$$B = z_2/\cos \cdot \beta_{w2}, \quad (6)$$

$$S' = r_{w2} \cdot \sin(180°/2z_{2k}) \cdot \cos \beta_{w2}, \quad (7)$$

где z_{2k} – число зубьев второго зубчатого колеса.

Для определения координат точек образующей линии, выполненной дугой окружности и применяемой при образовании боковой поверхности зуба второго колеса, получим следующие уравнения:

$$X_{A_2B_2} = -r_{w1} + R_1 \cdot \sin \alpha_n - \sqrt{R_1^2 - C^2}\ ;$$
$$Y_{A_2B_2} = -z_1 \cdot tg(\Sigma - \beta_{w1}); \quad (8)$$
$$Z_{A_2B_2} = z_1,$$

где R_1 - радиус окружности, по которой описывается дуга образующей линии; r_{w1} –радиус окружности впадин первого колеса; z_1 – координата точек образующей линии второго зубчатого колеса в системе координат первого зубчатого колеса; β_{w1} – угол наклона зуба к оси первого зубчатого колеса на начальном гиперболоиде в нормальном сечении, проходящем через межосевой перпендикуляр

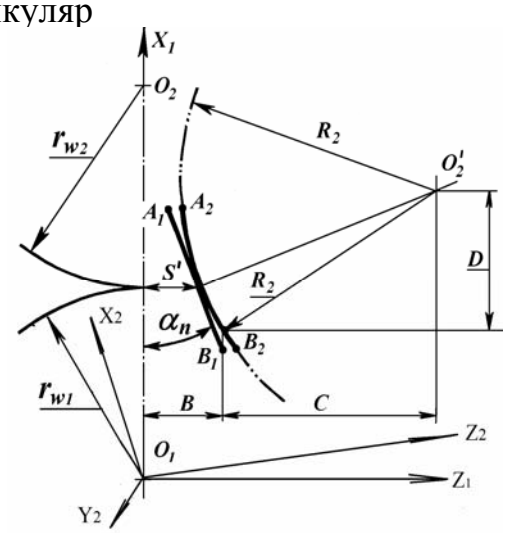

Рисунок 3. К расчету координат точек образующей линии, выполненной дугой окружности, ось Y_1 направлена против направления взгляда; X_2,Y_2,Z_2 – оси координат второго зубчатого колеса.

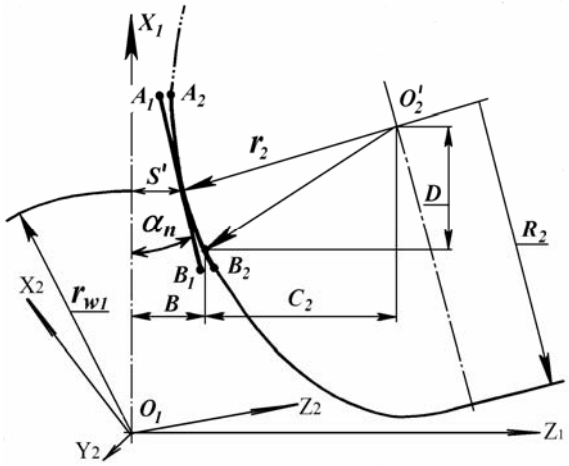

Рисунок 4. К расчету координат точек образующей линии, выполненной дугой эллипса, ось Y_1 направлена против направления взгляда; X_2,Y_2,Z_2 – оси координат второго зубчатого колеса.

C – коэффициент, определяемый по формуле:

$$C = S' + R_1 \cos \alpha_n - B, \quad (9)$$

где *S'* – коэффициент, определяемый по формуле:

$$S' = r_{w1} \cdot \sin(180°/2 \cdot z_1) \cdot \cos \beta_{w1} \quad (10)$$

B –коэффициент, определяемый по формуле:

$$B = z_1/\cos \cdot \beta_{w1}, \quad (11)$$

где z_1 – координата образующей линии второго зубчатого колеса в системе координат первого зубчатого колеса.

Для образующей линии, выполненной в виде дуги эллипса при образовании боковой поверхности зуба первого колеса, получим следующую формулу для расчета координат производящей линии (рисунок 4):

$$X_{A_2B_2} = -r_{w2} + r_2 \sin \alpha_n - \sqrt{R_2^2 - \left(C_2 / \cos(90^0 - \theta_2)\right)^2}$$
$$Y_{A_2B_2} = -z_2\, tg(\Sigma - \beta_{w2}); \qquad (12)$$
$$Z_{A_2B_2} = z_2,$$

где R_2 – большая полуось эллипса второго зубчатого колеса;
z_2 – координата образующей линии первого зубчатого колеса в системе координат второго зубчатого колеса; r_2 – малая полуось эллипса второго зубчатого колеса, определяемая по формуле (рисунок 4):

$$r_2 = R_2 \cdot \cos(90° - \theta_2), \qquad (13)$$

где θ_2 – угол между плоскостью, в которой расположена образующая линия дуги эллипса первого колеса и плоскостью, нормальной направлению зуба на начальном гиперболоиде и проходящей через межосевой перпендикуляр;
C_2 – коэффициент, определяемый по формуле (рисунок 4):

$$C_2 = S' + R_2 \cos(90° - \theta_2) - B, \qquad (14)$$

где B и S' – коэффициенты, определяемые по формулам (6) и (7) соответственно.

Для координат точек производящей линии, выполненной в виде дуги эллипса и применяемой при образовании боковой поверхности зуба второго колеса, получим:

$$X_{A_2B_2} = r_{w1} + R_1 \cdot \sin \alpha_n - \sqrt{R_1^2 - \left(C_2 / \cos(90° - \theta_1)\right)^2}, \qquad (15)$$

где R_1 – большая полуось эллипса первого зубчатого колеса;
C_2 – коэффициент, определяемый по формуле:

$$C_2 = S' + R_1 \cos(90° - \theta_1) - B, \qquad (16)$$

где θ_1 – угол между плоскостью, в которой расположена образующая линия дуги эллипса второго колеса, и плоскостью, нормальной направлению зуба на начальном гиперболоиде и проходящей через межосевой перпендикуляр.

Коэффициенты B и S' в формуле (16) определяются по формулам (10) и (11).

В разделе 2.3. на основе рассчитанных ранее координат точек образующей линии и направляющей линии зуба осуществлено геометрическое моделирование гиперболоидного зубчатого колеса с зубьями двойной кривизны.

Таким образом, в результате исследований, проведенных во второй главе, получены математические зависимости расчета координат точек направляющей линии при формообразовании боковой поверхности зуба зубчатого колеса, и для расчета координат точек образующих линий в виде дуг окружностей и эллипса. На основе рассчитанных координат точек направляющей и образующей линии разработана геометрическая модель зубчатого колеса.

В главе третьей разработана математическая модель боковой поверхности зуба зубчатого колеса, а также получены математические зависимости для управления ориентацией фрезы при пятикоординатном формообразовании боковой поверхности зубьев.

В разделе 3.1. разработана математическая модель поверхности, полученной пересечением поверхности, образованной образующей линией при формообразовании боковой поверхности зуба и поверхностями однополостных гиперболоидов, формирующих поверхности головок и ножек зубьев.

Разработку математической модели боковой поверхности зуба осуществим для образующей линии *AB* (следа режущей кромки инструмента), фрагмент которой при движении, воспроизводящем зацепление с учетом ограничения поверхностями вершин и ножек зубьев, сформирует боковую поверхность зуба в процессе резания концевой фрезой на пятикоординатном станке с ЧПУ.

Начальное положение образующей линии *AB* задается в сечении, нормальном к направлению боковой поверхности зуба и проходящем через межосевой перпендикуляр.

Для получения математической модели боковой поверхности зуба примем, что два гиперболоидных колеса, представленные для удобства отображения половинами делительных гиперболоидов, находятся в зацеплении и вращаются с угловыми скоростями ω_1 и ω_2 вокруг осей Y_1 и Y_2 соответственно (рисунок 5).

Рассмотрим кинематику формообразования в относительном движении. Примем колесо *1* и систему координат $X_1Y_1Z_1$ неподвижными. Система координат $X_2Y_2Z_2$ и связанное с ней колесо *2* вращаются вокруг оси Y_1 с постоянной угловой скоростью ω_1, но в противоположном направлении. Ось Y_2 является осью вращения гиперболоида *2*, вокруг которой он вращается с угловой скоростью ω_2. Образующая прямая, которой принадлежит отрезок следа режущей кромки инструмента *AB*, формирующая боковую поверхность зуба, вращается совместно с колесом *2* вокруг оси Y_2 и одновременно движется поступательно вдоль оси Y_2. Поверхность, которую описывает образующая прямая относительно колеса *1* в диапазоне между условными поверхностями, ограничивающими вершины и ножки зубьев, будет соответствовать боковой поверхности зуба.

Уравнение поверхности, полученной пересечением поверхности, сформированной образующей линией, и поверхностью, ограничивающей головки зубьев зубчатого колеса, представлено следующей зависимостью:

$$(((x_1^B(t)+t_1\cdot l_1(t))^2+((z_1^B(t)+t_1\cdot n_1(t))^2)\cdot\frac{\left(1+\frac{2,5}{z_k}\right)^2}{a_1^2}-\frac{\left(y_1^B(t)+t_1\cdot m_1(t)\right)^2}{b_1^{\,2}}=1, \qquad (17)$$

где $x_1^B(t)$, $y_1^B(t)$, $z_1^B(t)$ - координаты точки *B* производящей линии; z_k - число зубьев зубчатого колеса; a_1, b_1 –действительная и мнимая полуоси гиперболы, формирующей поверхность, ограничивающую вершины зубьев зубчатого колеса; $l_1(t)$, $m_1(t)$, $n_1(t)$ – координаты направляющего вектора, t_1 –параметр, определяющий ориентацию образующей линии.

Уравнение поверхности, полученной пересечением поверхности, сформированной образующей линией, и поверхностью, ограничивающей ножки зубьев зубчатого колеса, представлено следующей зависимостью:

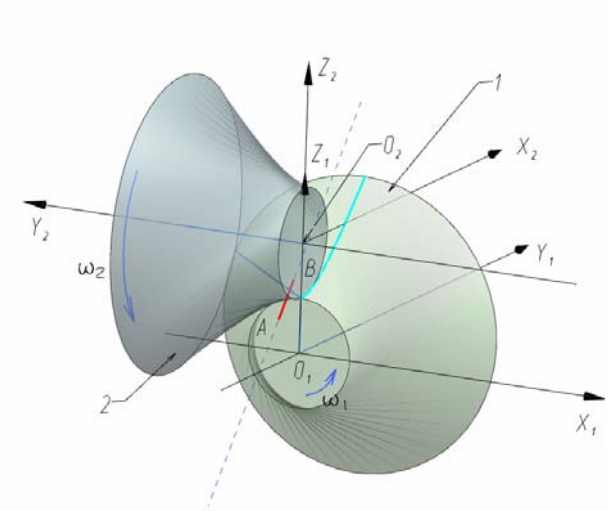

Рисунок 5. Схема к получению математической модели боковой поверхности зубьев.
делительный гиперболоид обрабатываемого колеса; 2 - делительный гиперболоид, с которым связана образующая линия; ω_1,ω_2 – направление вращения делительных гиперболоидов.

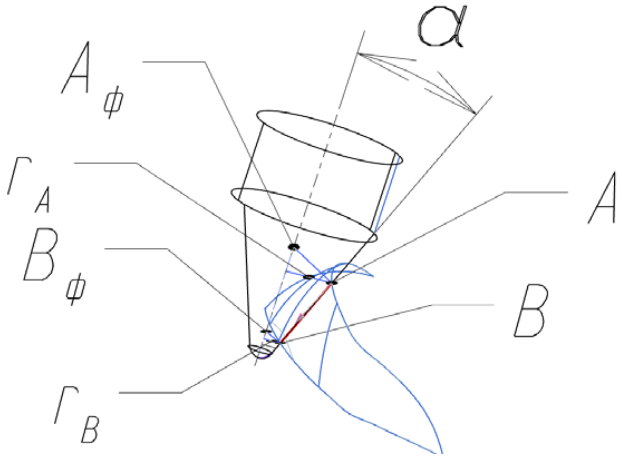

Рисунок 6. К расчету ориентации концевой фрезы при формообразовании боковой поверхности зуба
r_a – радиус инструмента в точке A; r_b – радиус инструмента в точке B; α – угол наклона фрезы.

$$((x_1^A(t)+t_1\cdot l_1(t))^2+((z_1^A(t)+t_1\cdot n_1(t))^2\cdot\frac{\left(1-\frac{2}{z_k}\right)^2}{a_2^2}-\frac{\left(y_1^A(t)+t_1\cdot m_1(t)\right)^2}{b_2{}^2}=1, \tag{18}$$

где $x_1^A(t)$, $y_1^A(t)$, $z_1^A(t)$ -координаты точки A производящей линии; a_2, b_2 – действительная и мнимая полуоси гиперболы, формирующей поверхность, ограничивающую ножки зубьев зубчатого колеса.

В разделе 3.2. получена математическая зависимость для расчета угла ориентации оси инструмента (рисунок 6) при пятикоординатном фрезеровании.

Координаты точки $B_ф$ фрезы (рисунок 6) в системе координат обрабатываемого зубчатого колеса определяются расстоянием от боковой поверхности зуба в направлении нормали с учетом радиуса фрезы:

$$\overline{BB_ф}=\frac{r_B^ф}{\cos\alpha}\begin{vmatrix}\vec{i}_1 & \vec{j}_1 & \vec{k}_1\\ \frac{x_1^A-x_1^B}{|BA|} & \frac{y_1^A-y_1^B}{|BA|} & \frac{z_1^A-z_1^B}{|BA|}\\ \frac{dx_1^B}{k^B dt} & \frac{dy_1^B}{k^B dt} & \frac{dz_1^B}{k^B dt}\end{vmatrix}, \tag{19}$$

$$\text{где } k^B=\sqrt{\left(\frac{dx_1^B}{dt}\right)^2+\left(\frac{dy_1^B}{dt}\right)^2+\left(\frac{dz_1^B}{dt}\right)^2}, \tag{20}$$

где координаты касательной к линии головок зубьев определим по следующим формулам:

$$\frac{dx_1^B}{dt} = O_1O_2 \cdot \omega_1 \cdot \cos(\omega_1 t) + r_2^B(\omega_2 \cdot \cos(y_2^B(0) + \omega_2 t) \cdot \sin(\omega_1 t) + + \sin(y_2^B(0) + \omega_2 t) \cdot (\omega_1 \cdot \cos(\omega_1 t)) - V_2^y;$$

$$\frac{dy_1^B}{dt} = \frac{d}{dt}(r_2^B \cdot \cos(y_2^B(0) + \omega_2 t)) = -r_2^B \cdot \omega_2 \cdot \sin(y_2^B(0) + \omega_2 t)); \qquad (21)$$

$$\frac{dz_1^B}{dt} = -O_1O_2 \cdot \omega_1 \cdot \sin(\omega_1 t) + r_2^B(\omega_2 \cdot \cos(y_2^B(0) + \omega_2 t) \cdot \cos(\omega_1 t) + \omega_1 \sin(y_2^B(0) + \omega_2 t) \cdot (-\sin(\omega_1 t)) - V_2^y,$$

где x_1^B, y_1^B, z_1^B – координаты точки B в неподвижной системе координат, связанной с заготовкой; $y_2^B(0)$ – координаты точки B в подвижной системе координат, связанной с образующей линией в начальный период времени; r_2^B - радиус инструмента в точке B; V_2^y – скорость движения образующей зуба в системе координат $O_2x_2y_2z_2$ вдоль оси Y_2; O_1O_2 - отрезок прямой, соединяющий центры гиперболоидов 1 и 2 (рисунок 5); ω_1 –скорость вращения делительного гиперболоида, связанного с нарезаемым зубчатым колесом; ω_2 – скорость вращения делительного гиперболоида, связанного с образующей линией зуба в процессе формообразования его боковой поверхности.

Аналогично определяются координаты точки $A_ф$.

Уравнение для вектора $\overline{B_ф A_ф}$ (рисунок 6), определяющего ориентацию инструмента в системе координат обрабатываемого колеса, имеет вид:

$$\overline{B_ф A_ф} = \left(x^{Aф} - x^{Bф}\right)\bar{i} + \left(y^{Aф} - y^{Bф}\right)\bar{j} + \left(z^{Aф} - z^{Bф}\right)\bar{k}, \qquad (22)$$

где $x^{Aф}$, $y^{Aф}$, $z^{Aф}$ координаты точки $A_ф$ в системе координат обрабатываемого зубчатого колеса, $x^{Bф}$, $y^{Bф}$, $z^{Bф}$ – координаты точки $B_ф$ фрезы в системе координат обрабатываемого зубчатого колеса, $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ - координатные векторы.

В четвертой главе представлены результаты разработки способа предварительного формообразования зубьев модульными дисковыми и пальцевыми фрезами, инструмента для профильной модификации зубьев, экспериментального формообразования зубьев на универсально-фрезерном станке с ЧПУ.

В разделе 4.1. изложен способ предварительного формообразования зубьев зубчатых колес, позволяющий по приведенному числу зубьев осуществлять выбор инструмента из набора модульных зуборезных фрез.

В разделе 4.2 для выбранного зубчатого колеса приведен ориентировочный расчет времени предварительной обработки на многокоординатном станке с ЧПУ, оценочный расчет режимов резания, времени предварительной обработки зубьев, необходимой мощности резания и ее сравнение с паспортными данными станка с ЧПУ.

Для осуществления формообразования зубьев по разработанному способу изготовления обрабатываемому колесу сообщают вращательные движения вокруг своей оси и оси воображаемого производящего колеса, ось которого скрещивается с осью обрабатываемого. Обработка зубьев ведется в условиях изменения межосевого расстояния между осью обрабатываемого и осью производящего зубчатого колеса от величины, равной диаметру начальной окружности обрабатываемого колеса в горловом сечении, до величины, равной сумме радиусов начальных окружностей в торцевом и горловом сечениях.

Формообразование зубьев зубчатых колес осуществляют фрезой, ось которой устанавливают параллельно образующей начального гиперболоида колеса в его горловом сечении и сообщают фрезе вращательное движение вокруг своей оси. Способ изготовления отличается тем, что периодическое деление осуществляют на угол, значение которого определяют по зависимости $\varphi = 2\pi / z_k$, где z_k – число зубьев изготавливаемого колеса, а обработку зубьев выполняют модульными дисковыми или пальцевыми фрезами (рисунок 7).

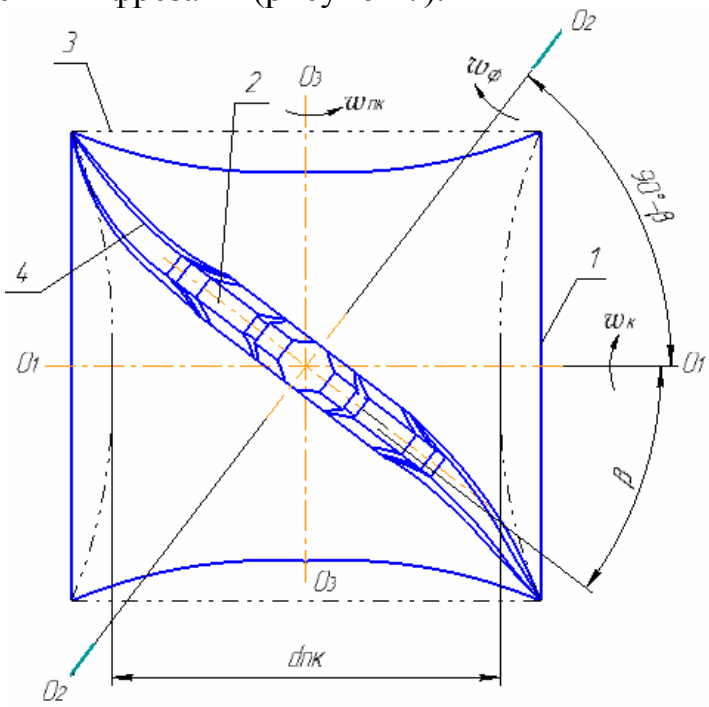

Рисунок 7. Схема предварительного формообразования зубьев дисковой модульной фрезой

1- формообразуемое зубчатое колесо; 2- инструмент; 3-производящее колесо; 4 – формообразуемая впадина зуба; O_1-O_1, O_2-O_2, O_3-O_3 – оси вращения формообразуемого зубчатого колеса, инструмента и производящего колеса соответственно; $\omega_к$, $\omega_ф$, $\omega_{ПК}$ – угловые скорости вращения формообразуемого колеса, фрезы и производящего колеса соответственно; $d_{ПК}$ – диаметр производящего колеса; β – угол наклона зубьев зуба к оси O_1-O_1 зубчатого колеса на начальном гиперболоиде в нормальном сечении, проходящем через межосевой перпендикуляр.

Выбор номера фрезы из набора фрез осуществляют по приведенному числу зубьев, определяемого по формуле:

$$z_{пр} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \qquad (23)$$

где коэффициенты A,B,C определяются по формулам:

$$A = \frac{m_n^{\ 2} \cdot \sin\alpha_n}{4}, \qquad (24)$$

где m_n – модуль зубчатого колеса в нормальном сечении зуба и проходящем через межосевой перпендикуляр, α_n – угол зацепления в нормальном сечении зуба,

$$B = m_n \cdot h_a, \qquad (25)$$

где h_a – высота головки зуба

$$C = h_a^2 - \rho_a^2, \qquad (26)$$

где ρ_a – радиус кривизны эвольвенты.

На способ изготовления гиперболоидных зубчатых колес получен патент на изобретение № 2341357.

В разделе 4.3 разработан инструмент для профильной модификации зубьев, отличающийся тем, что режущие кромки модифицированы дугой окружности на участках, равных 0,2 высоты постоянным радиусом R, определяемым по формуле:

$$R = \frac{(0{,}2h_i)^2 + \Delta_\Sigma{}^2}{2 \cdot \Delta_\Sigma}, \qquad (27)$$

где $0{,}2h_l$ – высота модифицированного участка в зависимости по высоты зуба; h_l – высота зуба; Δ_Σ - величина максимальной суммарной погрешности зуба зубчатого колеса.

Для оценочного определения порядка требуемых модификаций режущих кромок гребенчатой фрезы была получена следующая формула:

$$\Delta_\Sigma = \Delta_ш + f_f + \Delta_{xp} + \Delta_u, \qquad (28)$$

где $\Delta_ш$ – параметр, учитывающий шероховатость боковой поверхности зубьев; f_f – допуск на погрешность профиля; Δ_{xp} – суммарный допуск величин f_x и f_p, мм, определяемый по формуле:

$$\Delta_{xp} = \frac{\sqrt{6}}{2}\left(\frac{f_x}{6} + \frac{f_p}{6}\right), \qquad (29)$$

где f_x – допуск на предельное смещение средней плоскости зуба зубчатого колеса; f_p – допуск на отклонение шага; Δ_u – оценочный параметр, позволяющий приближенно определить порядок деформаций при изгибе зуба зубчатого колеса под нагрузкой, определяемый по формуле:

$$\Delta_u = \frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 72 \cdot F_t \cdot h_l^3}{\bar{S}_f^3 \cdot B}, \qquad (30)$$

где F_t – окружная сила, приложенная на вершине зуба; h_l –высота зуба; $\bar{S}_f$ – толщина зуба по хорде окружности впадин; B – ширина зубчатого колеса.

На инструмент получен патент на изобретение № 2323069.

В разделе 4.4. представлены результаты экспериментальных исследований по обработке зубьев зубчатых колес на станке с ЧПУ. Возможность обработки гиперболоидных зубчатых колес двойной переменной кривизны на многокоординатных станках с ЧПУ проверялись обработкой зубьев концевой фрезой (рисунок 8).

Для изготовления заготовки подсчитывались параметры гиперболы, ограничивающей вершины зубьев зубчатого колеса. По рассчитанным параметрам гиперболы была построена объемная геометрическая модель заготовки, по которой была разработана управляющая программа. Проверка геометрии обработанной поверхности однополостного гиперболоида вращения на соответствие чертежу осуществлялась с помощью специального шаблона.

После формообразования поверхности, ограничивающей вершины зубьев

зубчатого колеса, была осуществлена обработка зубьев на универсально-фрезерном станке с ЧПУ. При этом обработка зубьев разбивалась на черновую и чистовую обработку. Обработка зубьев осуществлялась концевыми фрезами.

В разделе 4.5 приведены результаты опробования и внедрения результатов диссертационного исследования. Результаты диссертации внедрены и опробованы на ООО «АДЕМ-Центр» в качестве алгоритмов и математических зависимостей, используемых в CAD/CAM-системе ADEM для получения геометрических моделей и составления управляющих программ обработки зубьев на заготовке вида «однополостной гиперболоид вращения». На ООО «АДЕМ-Центр» было

Рисунок 8. Формообразование зубьев фрезерованием концевой фрезой на станке с ЧПУ

опробовано чистовое фрезерование зубьев с использованием разработанной математической модели многокоординатного фрезерования зубьев. Было получено снижение времени чистовой обработки зубьев на 12% по сравнению с временем обработки при создании управляющей программы по геометрической модели зубчатого колеса. На АО «Вакууммаш» переданы для практического использования и опробованы результаты работы в части предварительного формообразования гиперболоидных зубчатых колес с зубьями двойной переменной кривизны зуборезными модульными фрезами. При осуществлении эксперимента рассчитывалось приведенное число зубьев и выбиралась дисковая модульная фреза из набора фрез. Далее с использованием разработанной математической модели определялся вектор изменения ориентации положения дисковой модульной фрезы в процессе формообразования, который вводился в CAM-систему при создании управляющей программы. Для реализации опыта на станке дополнительно была разработана и изготовлена специальная оправка для дисковой модульной фрезы, которая устанавливалась в цанговый патрон станка с ЧПУ и производилась предварительная обработка зубьев (рисунок 9). Время предварительной обработки зубьев зубчатого колеса дисковой модульной фрезой по управляющей программе составило 9 минут, при обработке такого же зубчатого колеса концевой фрезой – 7 часов.

Результаты исследования переданы ПАО «Камаз» для практического использования и опробованы в части создания опытных высоконагруженных зубчатых пар главной передачи грузового автомобиля по гранту Минобрнауки РФ «Перспективные экологичные транспортные средства с высокими потребительскими свойствами и низким уровнем эксплуатационных затрат».

Рисунок 9. Предварительная обработка дисковой модульной фрезой гиперболоидных зубчатых с зубьями двойной кривизны на многокоординатном станке с ЧПУ.

Изготовлены опытные образцы зубчатых колес.

По результатам экспериментальных исследований было отмечено, что:

- при обработке концевой фрезой гиперболоидных зубчатых колес двойной кривизны на пятикоординатных станках с ЧПУ следует использовать предложенную методику управления ориентацией фрезы, так как она позволяет осуществлять чистовую обработку боковой поверхности зуба (с учетом допущения об обеспечении стойкости инструмента) за один проход, а также использовать для формообразования зубьев на пятикоординатных станках с ЧПУ специальные и фасонные инструменты.
- для повышения стойкости инструмента и производительности зубофрезерования с использованием предлагаемой методики управления ориентации инструмента следует (предварительно обработав область горлового сечения) применять стратегию обработки боковой поверхности зубьев от горлового сечения зубчатого колеса к торцовым сечениям, что увеличивает производительность фрезерования концевыми фрезами.
- способ предварительного формообразования зубьев в совокупности с разработанной кинематикой многокоординатного формообразования зубьев позволяет значительно сократить время предварительной обработки рассматриваемых в работе зубчатых колес.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель расчета кинематики пятикоординатного формообразования фрезерованием зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной переменной кривизны, включающая в себя получение математической модели поверхности, полученной движением образующей линии,

определение поверхностей, ограничивающих линии головок и ножек зубьев, расчет угла ориентации оси инструмента. Полученная математическая модель позволяет осуществлять обработку зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной переменной кривизны с использованием непосредственного ввода данных в станок с ЧПУ без использования систем подготовки управляющих программ. Изложен алгоритм расчета и ввода полученных значений вектора ориентации и координат точек трассировки инструмента в программное обеспечение для подготовки управляющих программ при реализации разработанной кинематики формообразования зубьев.

2. Получены математические зависимости для расчета координат точек образующей линии, позволяющие создавать геометрические модели зубьев двойной переменной кривизны, боковая поверхность зубьев которых получается движением образующей линии вдоль направляющей линии. Разработаны математические зависимости для расчета координат точек образующих линий, выполненных дугами окружности и эллипса и используемых при осуществлении профильной модификации зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной кривизны.

3. Разработана геометрическая модель гиперболоидного зубчатого колеса с зубьями двойной переменной кривизны, используемая для пятикоординатного формообразования фрезерованием.

4. Разработан способ предварительного формообразования боковой поверхности зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной переменной кривизны модульными дисковыми и пальцевыми фрезами, позволяющий увеличить производительность обработки по сравнению с обработкой концевой сфероконической фрезой. Для выбора номера инструмента из набора фрез получена математическая зависимость. Разработан инструмент для осуществления профильной модификации зубьев гиперболоидного зубчатого колеса двойной кривизны, позволяющий учитывать в геометрии режущих кромок инструмента следующие погрешности изготовления и деформации зубьев под нагрузкой: погрешность профиля зубьев, погрешность шага зубьев, смещение средней плоскости зубьев зубчатого колеса, шероховатость боковой поверхности зубьев, смещение зубьев под нагрузкой.

5. Доказана технологическая возможность практической реализации формообразования фрезерованием зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной переменной кривизны на пятикоординатных станках с ЧПУ. Разработаны управляющие программы токарной обработки гиперболоида вершин зубьев и фрезерной пятикоординатной обработки зубьев с использованием предложенной кинематики формообразования для зубчатых колес.

6. Разработанный способ предварительного формообразования зубьев в совокупности с разработанной кинематикой многокоординатного формообразования зубьев позволяет существенно сократить время обработки зубчатых колес.

Новизна и полезность технических решений подтверждена двумя патентами РФ на изобретение и одним патентом на полезную модель.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях по перечню ВАК РФ:

1. Печенкин М.В. Профильная модификация зубьев гиперболоидной передачи//Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н.Туполева, №2, 2007, стр. 29-32
2. Печенкин М.В., Абзалов А.Р. Расчет положения производящих линий при формообразовании боковой поверхности зубьев гиперболоидной передачи// Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6 [Электронный журнал], URL: http://www.science-education.ru/120-16410.
3. Печенкин М.В., Абзалов А.Р. Кинематика формообразования боковой поверхности зубьев гиперболоидной передачи концевым инструментом//Фундаментальные исследования, № 12 (часть 11) 2014, стр. 2310-2314, URL: http://www.rae.ru/fs/pdf/2014/12-11/36686.pdf.

Патенты на изобретения и полезные модели:

4. Пат. 2341357 Российская Федерация. Способ изготовления гиперболоидных зубчатых колес/Печенкин М.В., опубл. 20.12.2008, Бюл. № 35.
5. Пат. 232069 Российская Федерация. Гребенчатая фреза/Печенкин М.В., опубл. 27.04.2008, Бюл. №12.
6. Пат. на пол. модель Российская Федерация. Гиперболоидная зубчатая передача / Печенкин М.В., опубл. 27.09.2009, Бюл. № 27.

Публикации в других изданиях:

7. Печенкин М.В. Исследование формообразования зубьев гиперболоидных колес в среде Siemens Advanced Simulation// Сборник докладов Международной научно-практической конференции АКТО-2014. – Казань 2014: Изд-во Казан. нац. иссл. техн. ун-та им. А.Н. Туполева, 2014. Том I, с. 415-416.
8. Печенкин М.В. Методика исследования взаимного положения боковых поверхностей зубьев гиперболоидной передачи на ЭВМ в процессе зацепления// Сборник докладов Международной научно-практической конференции АКТО-2014. – Казань, 2014: Изд-во Казан. нац. иссл. техн. ун-та им. А.Н. Туполева, 2014. Том I, с. 417-419.
9. Печенкин М.В. Анализ неточностей изготовления гиперболоидных зубчатых колес// Сборник докладов V Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики "АНТЭ-2009". Т 2. 12-13 октября 2009 года. Казань: Изд-во гос. техн. ун-та, 2009. 712 с. с. 215-219
10. Печенкин М.В. Модификация профиля – один из способов повышения технологичности зубчатых колес// Рабочие процессы и технология двигателей. Сборник трудов международной научно-технической конференции, посвященной 1000-летию города Казани, 23-27 мая 2005 г: Материалы конференции: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2005 г., с. 168-170.