

На правах рукописи

Токарев Василий Владимирович

**Имитационная математическая модель
геометрических параметров процесса
червячного зубофрезерования.
Метрологические аспекты и
алгоритмическое обеспечение**

Специальность 05.03.01 – «Процессы механической и физико-технической обработки, станки и инструмент»

Специальность 05.13.16 – «Применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях (машиностроение)»

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

Волгоград – 1998

Диссертация выполнена на кафедрах «Вычислительная техника» и «Металлорежущие станки и инструменты» Волгоградского Ордена Трудового Красного Знамени государственного технического университета.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, академик, вице-президент Метрологической Академии Российской Федерации Муха Ю.П.

Научный консультант – доктор технических наук, профессор Смольников Н.Я.

Официальные оппоненты – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Козлов А.А.

доктор технических наук, профессор, действительный член Метрологической Академии Российской Федерации Шевчук В.П.

Ведущее предприятие – АОТ «Волгоградский тракторный завод»

Защита диссертации состоится 30 июня 1998 г. в 10 часов в аудитории 209 на заседании диссертационного совета К 063.76.04 в Волгоградском государственном техническом университете по адресу:

400066, г. Волгоград, просп. Ленина, 28.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Волгоградского государственного технического университета.

Автореферат разослан 21 мая 1998 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ю.М.Быков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из наиболее перспективных направлений развития измерительной техники в настоящее время является направление, связанное с созданием интеллектуальных средств измерений и информационно-измерительных систем (ИИС). Принципиальной особенностью ИИС является возможность использования в процессе измерения априорной и текущей информации о цели и условиях измерений, а также о технической системе, процессе или величине, которая является объектом измерений. Источником информации об объекте измерений является как экспертное или эмпирическое знание, аккумулированное в базе измерительных знаний, так и имитационное моделирование поведения объекта измерений.

Одной из наиболее ответственных операций механической обработки, во многом определяющей эксплуатационные качества изделий машиностроения, является операция нарезания зубчатых колес червячными зуборезными фрезами. Применение ИИС в структуре систем измерения и управления процессами червячного зубофрезерования во многом ограничивается отсутствием математических моделей процесса червячного зубофрезерования, адекватных задачам измерений. Актуальность работы определяется необходимостью разработки алгоритмического обеспечения интеллектуальных измерительных процедур, что должно способствовать применению современных ИИС при исследовании и управлении процессом червячного зубофрезерования. Кроме того, актуальность разработки универсальной имитационной математической модели геометрических параметров процесса червячного зубофрезерования определяется необходимостью создания эффективного математического аппарата оптимизации конструкции зуборезного инструмента и формального аппарата оценки качества и оптимизации технологических операций зубофрезерования.

Решаемые в диссертационной работе вопросы являются составной частью цикла научно-исследовательских работ по созданию, исследованию и внедрению в производство прогрессивных зуборезных инструментов, проводимого в соответствии с научным направлением кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ) (тема госбюджетной НИР 12.103.07).

Цель работы. Целью работы является разработка имитационной математической модели (ИММ) процесса червячного зубофрезерования, предназначенной для использования в ИНИС в качестве источника информации о процессе обработки. В качестве информативных параметров выделены мгновенные геометрические параметры процесса обработки.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования явился, в наиболее общей форме, процесс обработки косозубого цилиндрического зубчатого колеса червячной зуборезной фрезой с осевыми или винтовыми стружечными канавками с диагональной или радиальной подачей. Предметом исследования явились геометрические и кинематические закономерности процесса червячного зубофрезерования, определяемые условиями обработки методом центроидного огибания и определяющие характер изменения динамических параметров процесса обработки.

Методы исследования. Диссертационная работа выполнена с использованием преимущественно теоретических (математических) методов исследования, вследствие чего основным средством достижения цели исследования явился формальный аппарат аналитической геометрии и теории оптимизации, аппарат алгоритмического описания измерительных процедур и численные методы решения инженерных задач. В основу работы положены результаты экспериментальных исследований, выполненных на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» ВолгГТУ за последние 30 лет.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые разработана универсальная ИММ геометрических параметров процесса червячного зубофрезерования, предназначенная для использования в ИнИС в качестве источника информации о поведении объекта измерений. Модель основывается на использовании нового метода определения параметров слоя, срезаемого любым зубом фрезы в любой момент времени обработки. По мнению автора, новой является как постановка основной задачи исследования (метрологические аспекты имитационного моделирования процесса зубофрезерования), так и предложенные методы ее решения.

Практическая ценность. Разработан программный комплекс автоматизированного проектирования и моделирования зубчатых передач, червячных зуборезных фрез и зубофрезерных операций «ФРЕЗА», реализующий предложенные алгоритмы моделирования. Предложена структура и получено общее уравнение измерений ИнИС, основанной на использовании ИММ процесса червячного зубофрезерования. Выработаны рекомендации по использованию ИММ в следующих предметных областях: метрология интеллектуальных измерений, САПР зуборезного инструмента, оптимизация технологических операций обработки зубчатых колес червячными зуборезными фрезами.

Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе ВолгГТУ.

Апробация работы. Материалы исследований докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях ВолгГТУ в 1992, 1994–1998 гг., на научно-технической конференции Волжского политехнического института в 1996 г., на I и III научно-практических конференциях студентов и молодых ученых Волгоградской области в 1994 и 1996 гг., а также на научно-технических конференциях, семинарах и объединенных заседаниях кафедр «Металлорежущие станки и инструменты», «Вычислительная техника», «Технология машиностроения» ВолгГТУ и Волжского политехнического института в 1994–1998 гг.

Публикации. По материалам исследований опубликовано три печатные работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Диссертация содержит 231 страницу машинописного текста, 65 рисунков, 2 таблицы. Список литературы включает 149 наименований. Приложения содержат 42 страницы, 1 рисунок, 8 таблиц.

На защиту выносятся:

1. Метрологическое обоснование использования ИММ процесса червячного зубофрезерования как источника информации о процессе обработки, адекватной задачам измерений в ИНИС.
2. Метод представления червячной зуборезной фрезы математической моделью и реализующий его алгоритм.
3. Алгоритм моделирования перемещений червячной фрезы и обрабатываемого колеса в процессе обработки (алгоритм прямой трассировки зубьев фрезы).
4. Метод представления обрабатываемой поверхности впадины зуба заготовки фиксированными положениями «прошедших» примитивов на траекториях обратной трассировки и реализующий их алгоритм (алгоритм обратной трассировки зубьев фрезы).
5. Метод определения мгновенных площадей слоев, срезаемых каждым из зубьев червячной зуборезной фрезы в каждый из моментов времени обработки.
6. Алгоритмическое обеспечение имитационной математической модели геометрических параметров процесса обработки зубчатого колеса червячной фрезой.
7. Программный комплекс автоматизированного проектирования и моделирования эвольвентных зубчатых передач, червячных зуборезных фрез и зубофрезерных операций «ФРЕЗА».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечается актуальность разработки универсальной математической модели процесса червячного зубофрезерования, определяется специфика исследования и приводится краткое содержание всех разделов диссертационной работы.

В первой главе проводится анализ метрологических аспектов задачи построения ИММ процесса червячного зубофрезерования и современных представлений об интеллектуальных измерениях. На основе проведенного анализа формулируются цель и задачи, выделяются объект и предмет, определяются методы исследования.

Представления об интеллектуальных измерениях были введены в обращение в начале 80-х годов. Причиной этого явилось создание процессорных информационно-измерительных систем. Развитие теории интеллектуальных измерений привело к тому, что в настоящее время наличие процессора в составе измерительной цепи рассматривается как необходимое, но не достаточное условие интеллектуальных измерений. «Уровень интеллекта» ИНИС определяется как интегральный показатель, который характеризует общий уровень комплексного использования аппаратных и программно-алгоритмических возможностей измерений на основе априорной и текущей информации о цели, условиях измерений, поведении объекта измерений. Одним из источников информации об объекте измерений должно явиться математическое моделирование его поведения. Как показал анализ литературных источников, в приложении к решению задач механической обработки, ИНИС применяются, главным образом, в составе систем адаптивного управления металлорежущими станками токарной и фрезерной группы. Данные об использовании ИНИС в системах управления процессами червячного зубофрезерования в литературе отсутствуют. Средством создания ИНИС процесса зубофрезерования должна явиться разработка имитационной математической модели процесса обработки зубчатого колеса червячной фрезой.

Проведенный анализ априорных представлений об объекте моделирования позволил выделить наиболее значимые информативные параметры процесса обработки. Специфика червячного зубофрезерования заключается в том, что характер динамических параметров обработки в значительной степени обуславливается изменением во времени геометрических и кинематических характеристик (толщин срезаемых слоев и величин кинематических передних и задних углов для всех точек периметра режущих кромок всех работающих зубьев червячной фрезы) :

$$\vec{D}_t = \sum_{i=1}^{z_0} \sum_{j=1}^{z_i} \int_L \vec{D}(a_l, \alpha_l, \gamma_l) dl, \quad (1)$$

где \vec{D}_t – вектор динамических параметров процесса обработки; z_0 – число реек червячной зуборезной фрезы; z_i – число зубьев i -й рейки фрезы; a_l – мгновенная толщина срезаемого слоя в рассматриваемой точке режущей кромки; γ_l и α_l – мгновенные значения кинематических переднего и заднего углов для рассматриваемой точки, L – параметр режущей кромки.

Задача структурной и параметрической идентификации моделей вида (1) по экспериментальным данным является задачей чрезвычайно большой размерности, принципиально не имеющей единственного решения. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования (в частности, работы В.Н.Башкирова, К.Ziegler'a, G.Sulzer'a) свидетельствуют о наличии значимой монотонной связи между площадью слоя, срезаемого зубьями фрезы, и динамическими параметрами процесса обработки. В рамках диссертационной работы в качестве интегральной характеристики состояния процесса обработки используется мгновенная площадь слоя F_t , срезаемого каждым из зубьев фрезы, то есть модель (1) представляется в виде

$$F_t = \sum_{i=1}^{z_0} \sum_{j=1}^{z_i} \int_L a_l dl. \quad (2)$$

Характер связи между параметрами \vec{D}_t и F_t позволяет предположить наличие аналогии между представлениями этих сигналов в частотной области. Кроме того, разработанные методы позволяют определить мгновенные значения a_t , γ_t и α_t для любой точки любого зуба фрезы.

На основе проведенного анализа выделены следующие задачи исследования:

1. Разработка методов и алгоритмов представления червячной фрезы математической моделью.
2. Разработка алгоритмического обеспечения имитационного математического моделирования процесса червячного зубофрезерования.
3. Проверка корректности и надежности разработанных методов и алгоритмов.
4. Определение возможных предметных областей и методов практического применения разработанной ИММ.

Вторая глава посвящена изложению основных методов и алгоритмов моделирования. Проводится обзор и классификация методов математического исследования геометрических параметров процесса червячного зубофрезерования. На основе анализа методов, изложенных в работах В.Н.Башкирова, Г.И.Когана, С.И.Лашнева, С.Н.Медведицкова, А.Г.Ничкова, Т.Ю.Ротницкой, В.П.Филатова, В.А.Шишкова, А.Г.Шмулевича, М.И.Юликова, Б.К.Шунаева, а также С.Andrew, К.Bouzakis'a, R.Hamman'a, W.König'a, A.Schmidthammer'a, G.Sulzer'a, R.Thämer'a и других авторов, формулируются требования к разрабатываемой модели. В числе основных ограничений существующих методов отмечается их малая универсальность, обусловленная значительным числом допущений, и слабая формализованность. Для снятия этих ограничений, в модели должны быть учтены особенности процесса обработки, обусловленные следующими факторами: фактической формой режущих кромок (схемой резания, типом червяка); углами установки фрезы, наклона

стружечных канавок, подъема витков фрезы; числом заходов и реек фрезы; углом наклона и числом зубьев колеса и т.д. Формирование модели в виде комплекса формальных методов и алгоритмов позволяет автоматизировать процесс исследования.

Излагается метод и приводится алгоритм построения математической модели червячной зуборезной фрезы. Режущая кромка зуба фрезы представляется плоским «примитивом» – упорядоченным списком точек плоскости, заданных их координатами в системе координат (СК) $X_k Y_k$, связанной с зубом фрезы (рис. 1). Количество типов примитивов зависит от схемы резания червячной фрезы, количество точек в каждом из примитивов определяется конструкцией фрезы и заданной точностью описания. Червячная зуборезная фреза представляется «комплексом примитивов», количество и пространственное размещение которых в СК фрезы $X_0 Y_0 Z_0$ определяется типом и конструкцией фрезы (рис. 2). Размещение модели фрезы в СК $X_Z Y_Z Z_Z$, связанной с заготовкой (рис. 1), производится на основе метода первоначального позиционирования и заключается в назначении начальных координат центра СК $X_0 Y_0 Z_0$ в СК $X_Z Y_Z Z_Z$. Рассмотрены случаи обработки с диагональной и радиальной подачей, получены зависимости, определяющие зону контакта фрезы с заготовкой.

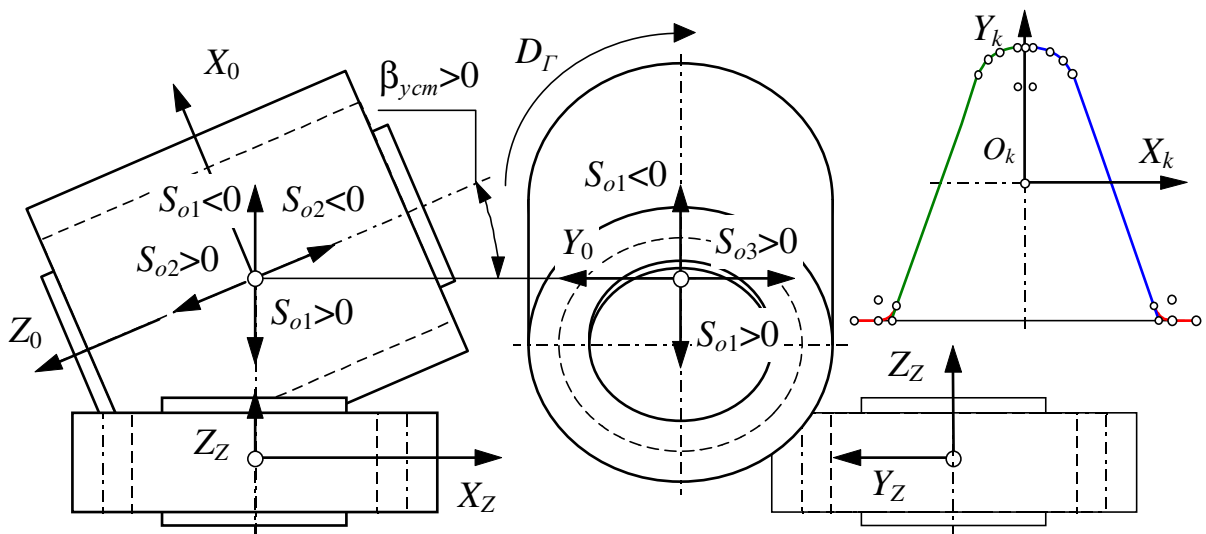


Рис. 1. Системы координат и соглашения о знаках движений подачи

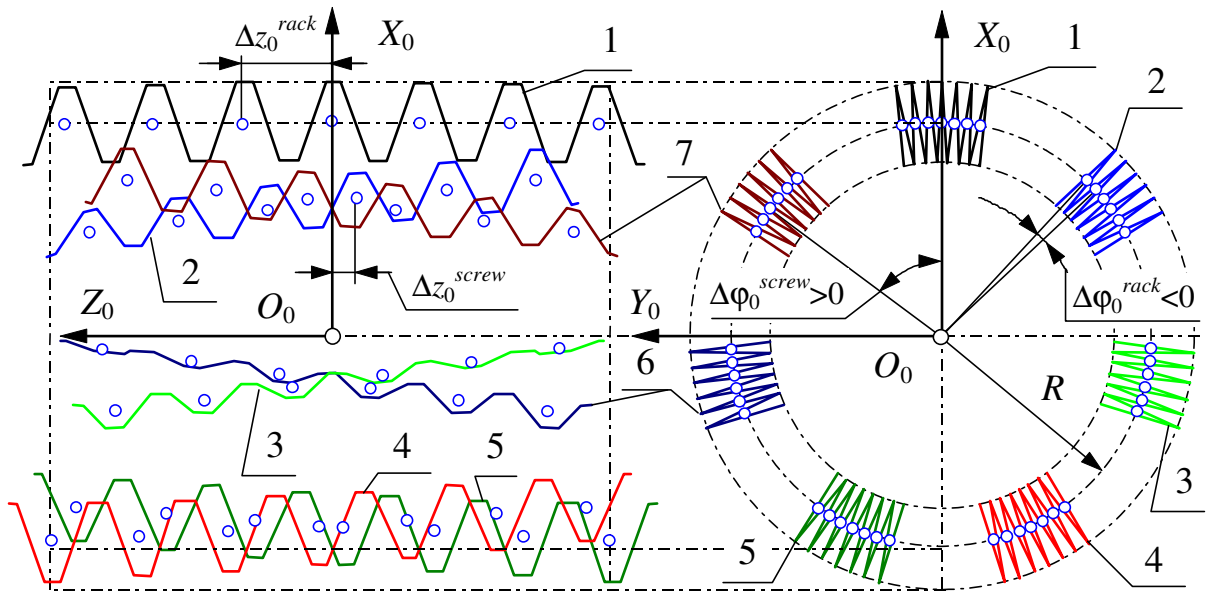


Рис. 2. Графическое представление математической модели двухзаходной правозаходной червячной зуборезной фрезы

Моделирование перемещения фрезы осуществляется посредством «алгоритма прямой трассировки зубьев». Вводится понятие «передаточное отношение фреза-заготовка» и понятия «квантов перемещения» фрезы в результате главного движения резания, движений обката и подач:

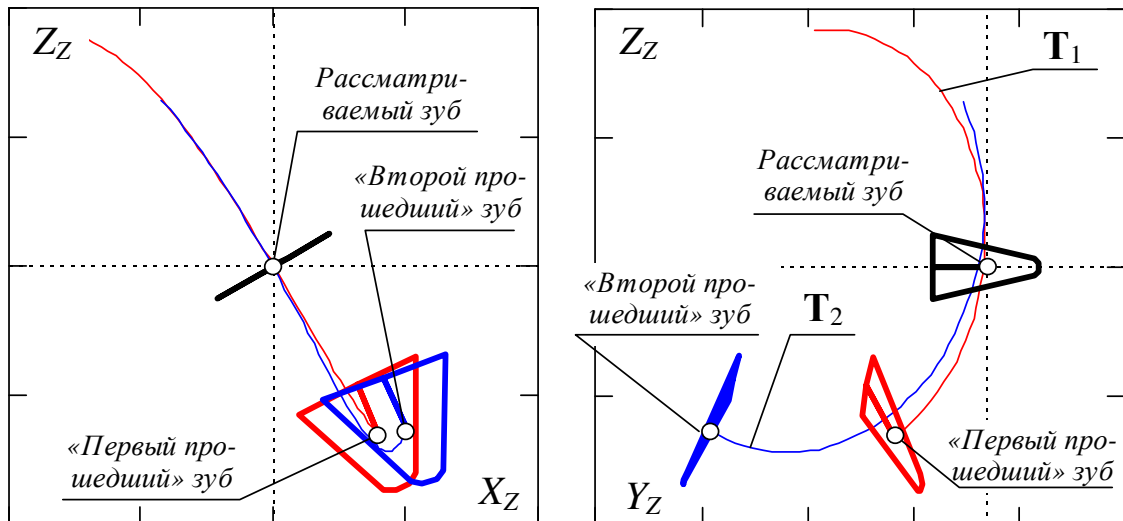
$$i_{01} = -\text{sign}(\gamma_{m0}) \left(\frac{z_1}{n_{z0}} - \frac{S_{o2}}{\pi 2R \text{tg}(\gamma_{R0})} \right) \left(1 - \text{sign}(\gamma_{m0}) \frac{S_{o1} \sin(\beta)}{z_1 \pi m} \right), \quad (3)$$

$$\Delta\varphi_0 = -\frac{2\pi}{n_{hob}}; \quad \Delta\varphi_Z = \frac{\Delta\varphi_0}{i_{01}}; \quad \Delta S_{01} = S_{01} \left| \frac{\Delta\varphi_Z}{2\pi} \right|; \quad \Delta S_{02} = S_{02} \left| \frac{\Delta\varphi_Z}{2\pi} \right|; \quad \Delta S_{03} = S_{03} \left| \frac{\Delta\varphi_Z}{2\pi} \right|.$$

В приведенных формулах: m – модуль; i_{01} – передаточное отношение «фреза-заготовка»; z_1 – число зубьев колеса; n_{z0} – число заходов фрезы; R – радиус, на котором расположены центры примитивов (в частном случае $R = d_{m0}/2$, d_{m0} – средний расчетный диаметр фрезы); γ_{R0} – угол подъема витков фрезы на цилиндре радиуса R ; β – угол наклона зубьев колеса; S_{01} – подача фрезы в направлении оси заготовки (встречная/попутная); S_{02} – осевая подача фрезы; S_{03} – радиальная подача; n_{hob} – число «тактов моделирования» на оборот фрезы. Кванты перемещений $\Delta\varphi_0$, $\Delta\varphi_Z$, ΔS_{01} , ΔS_{02} , ΔS_{03} используются для определения положений зубьев фрезы в

СК, связанной с заготовкой, на любом такте моделирования q .

В третьей главе излагаются методы и алгоритмы оценки мгновенного состояния процесса обработки. Методы основаны на восстановлении формы поверхности, обрабатываемой каждым из зубьев фрезы в каждый из моментов времени. Для восстановления формы обрабатываемой поверхности используются функциональные зависимости (ФЗ), определяющие «траектории обратной трассировки» зубьев – гладкие пространственные кривые, по которым зубья, формировавшие обрабатываемую поверхность (« k_z -прошедшие» зубья), приближались к тому положению, которое они заняли на рассматриваемом такте моделирования (рис. 3).



T_k - траектория обратной трассировки центра примитива k_z -прошедшего зуба

Рис. 3. Траектории обратной трассировки «прошедших» зубьев

ФЗ обратной трассировки есть векторные функции вида $G_z^\tau(i, j, q, k_z, \tau)$, где $G_z^\tau(\cdot)$ – вектор координат центра k_z -прошедшего примитива в СК $X_Z Y_Z Z_Z$, q – индекс такта моделирования, τ – «глубина обратной трассировки». Для выбора единственного положения каждого из k_z -прошедших примитивов, представляющих обрабатываемую поверхность, используется критерий минимизации евклидовой метрики $R(i, j, q, k_z, \tau) = |G_z(i, j, q, 0), G_z^\tau(i, j, q, k_z, \tau)|$ как функции глубины трассировки τ , где $G_z(i, j, q, 0)$ – вектор координат в СК $X_Z Y_Z Z_Z$ центра рассматриваемого примитива на такте

моделирования q . Применение такого подхода позволило построить операциональное определение слоя $[S_{i,j}]_q$, срезаемого рассматриваемым зубом фрезы на заданном такте моделирования q , в форме геометрического отношения, заданного на рассматриваемом $[P_{i,j}]_q$ и «оттрассированных» примитивах:

$$[S_{i,j}]_q = D_{a1} \cap \left([P_{i,j}]_q - [P_{i,j}]_q \cap \left(\bigcup_{k_z=1}^{K_{z0}} \mathbf{T} [P_{i-k_z,j}]_q \right) \right), \quad (4)$$

где \mathbf{T} – оператор обратной трассировки k_z -прошедшего примитива; K_{z0} – цикл схемы резания; D_{a1} – фигура, образованная рассечением тела заготовки плоскостью рассматриваемого примитива. Формула (4) представляет, по сути, свернутое изложение метода оценки мгновенной площади слоя, срезаемого любым зубом фрезы на заданном такте моделирования q . Для реализации метода, определенного формулой (4), разработаны следующие алгоритмы:

1. Алгоритм определения глубины обратной трассировки τ , доставляющей минимум функции $R(i, j, q, k_z, \tau)$.
2. «Алгоритм отсечения», который используется для выделения и удаления участков примитивов, находящихся вне тела заготовки.
3. Алгоритм перевода оттрассированного примитива в систему координат рассматриваемого примитива.
4. Алгоритм построения пересечения и объединения плоских фигур, заданных списками точек.
5. Алгоритм определения площади плоской фигуры.

Метод, основанный на использовании ФЗ обратной трассировки, позволяет также восстанавливать форму поверхности, обработанной на обороте заготовки, предшествовавшем рассматриваемому. Все разработанные алгоритмы объединены в общем алгоритме обратной трассировки зубьев и могут использоваться также (кроме алгоритма определения площади) для определения иных (помимо мгновенной площади срезаемого слоя) мгновенных геометрических параметров процесса обработки $(a_l, \gamma_l, \alpha_l)$.

Таким образом, основным результатом исследования является разработанная автором ИММ геометрических параметров процесса червячного зубофрезерования. ИММ процесса обработки представляет собой комплекс формальных методов и реализующих их алгоритмов. ИММ позволяет с любой степенью детализации анализировать процесс обработки с точки зрения его геометрических закономерностей. Общая схема разработанных методов и алгоритмов представлена на рис. 4.



Рис. 4. Схема разработанных методов и алгоритмов моделирования

В четвертой главе излагаются методики применения и указываются ограничения разработанной ИММ. Приводятся результаты практического моделирования технологической операции зубофрезерования. Выделяются следующие предметные области, в которых, по мнению автора, применение ИММ является целесообразным:

1. Разработка алгоритмического обеспечения ИНИС. Предлагается общая структура (рис. 5), излагается алгоритм функционирования и приводится уравнение измерений ИНИС, использующей ИММ. Модель применяется, в частности, для формирования динамической системы частотных фильтров $\{H(f)\}$, используемых для численного выделения системы информативных параметров процесса обработки $\left\{ \left[\phi(t_j) \right]_{\Delta k \phi} \right\}$ на фоне шумов.
2. Разработка оптимальных конструкций червячных зуборезных фрез и оптимизация схемы резания по критерию разделения «П-образных» слоев зубьями фрезы, критичными с точки зрения износа. Применение ИММ геометрических параметров процесса зубофрезерования является средством сокращения объемов длительных и дорогостоящих экспериментальных исследований.
3. Оптимизация технологических операций зубофрезерования по критерию равномерной загрузки зубьев фрезы (оптимизация величины осевых перестановок, рациональное использование диагональной подачи).

Проверка адекватности модели проводилась путем анализа сигналов площади срезаемого слоя (получен применением ИММ, см. рис. 6) и сигналов окружной силы резания, полученных экспериментальным путем и путем моделирования (для расчета силы резания как функции площади срезаемого слоя использовался метод В.Н.Башкирова).

Получены результаты, подтверждающие значимую статистическую связь сигналов окружной силы резания и площади срезаемого слоя во временной и частотной области (значения коэффициентов корреляции мгновенных значений и кросскорреляционных функций 0.65–0.75, $\alpha=0.05$). Различия значений толщин срезаемых слоев в зоне фактического контакта зубьев фрезы с заготовкой, полученных моделированием и расчетом по методу В.А.Шишкова и методу С.Н.Медведицкова, составляют 10–15% при $m=1-10$ мм.

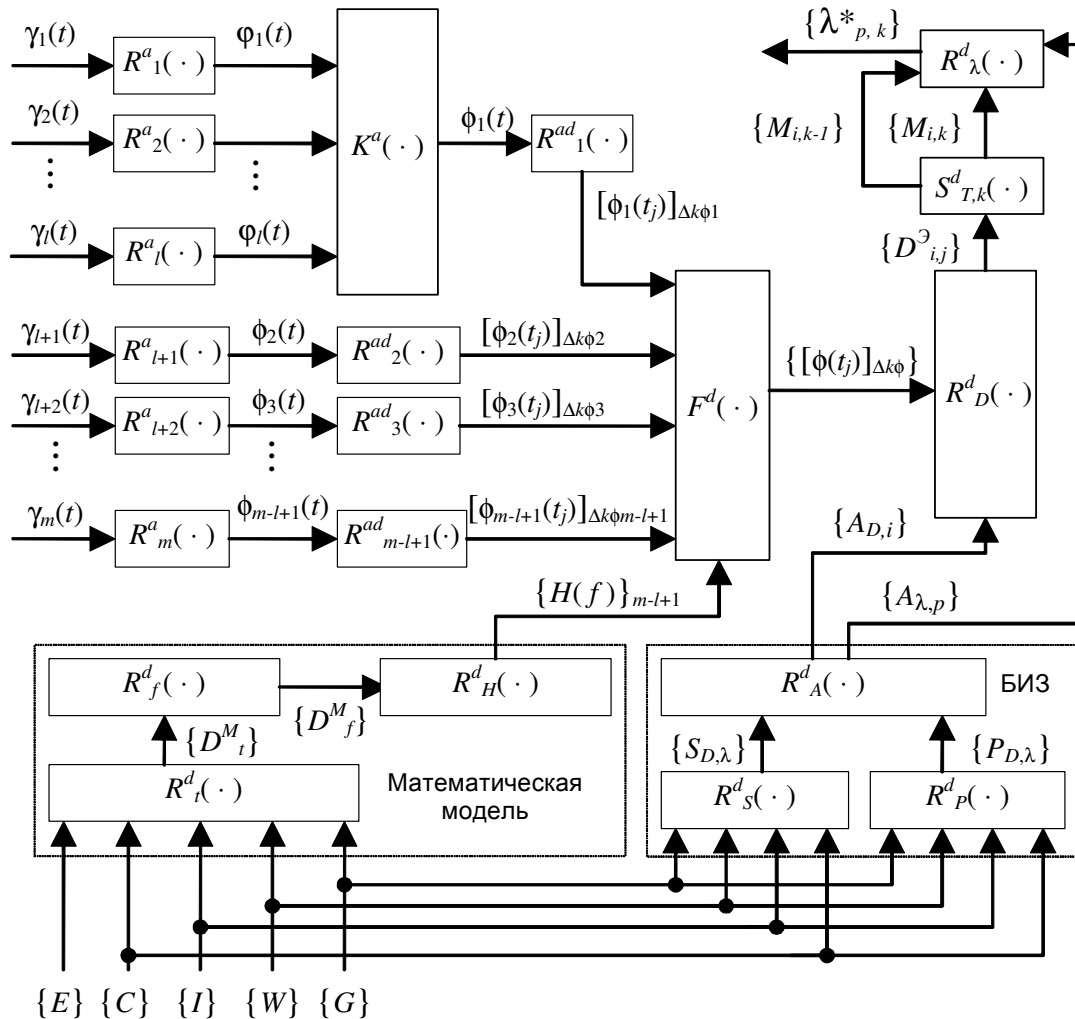


Рис. 5. Структура ИНИС косвенных измерений динамических параметров процесса червячного зубофрезерования

Основные методы и алгоритмы моделирования реализованы в рамках программного комплекса «ФРЕЗА». Комплекс «ФРЕЗА» разработан на основе объектного подхода с использованием средств RAD и предназначен для решения задач автоматизированного проектирования и моделирования на ПЭВМ класса 80386, 80486, Intel Pentium. В состав комплекса включены модули расчета и моделирования эвольвентных зубчатых передач, червячных зуборезных фрез и зубофрезерных операций. Излагаются возможности программного комплекса «ФРЕЗА», описывается его структура и принципы функционирования.

В качестве ограничений применения ИММ указаны следующие: модель не может быть непосредственно использована для исследования процесса внутреннего и конусного зубофрезерования, для моделирования обработки фрезами, имеющими заборный конус или криволинейную образующую.

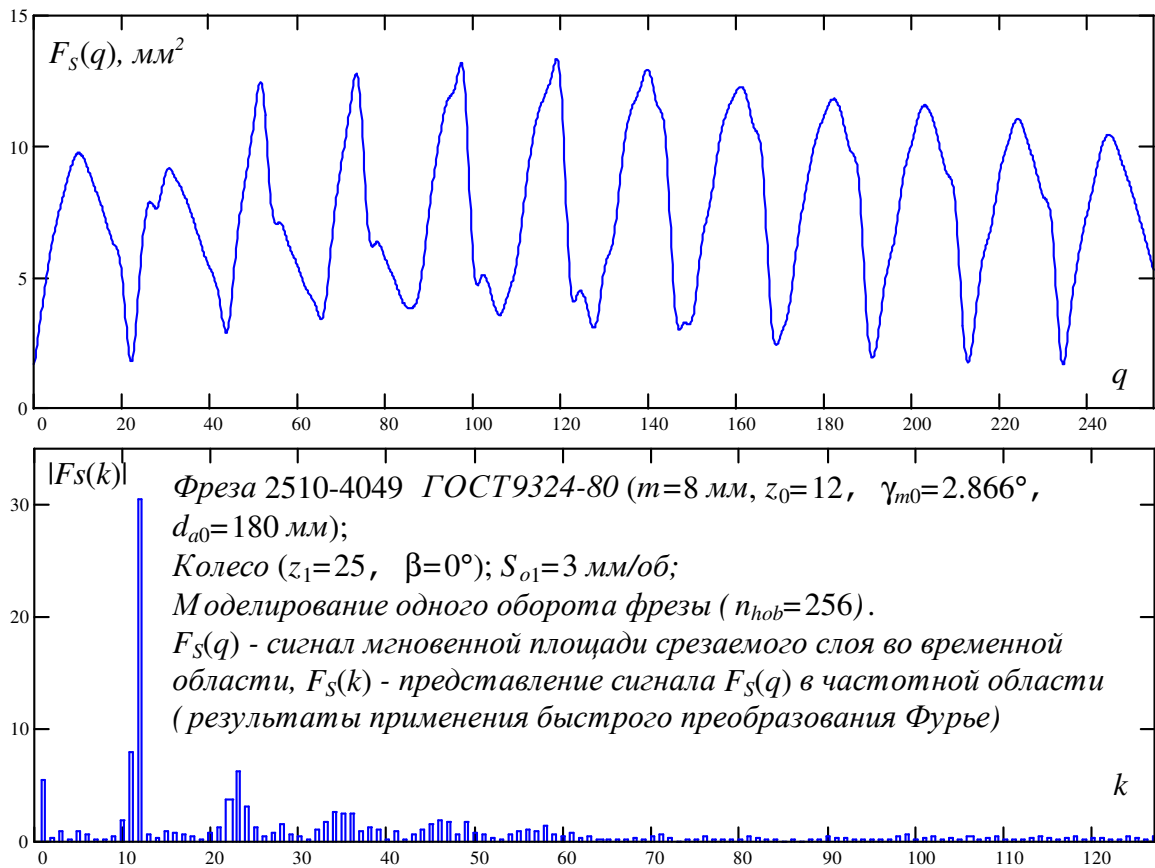


Рис. 6. Представление во временной и частотной области сигнала мгновенной площади срезаемого слоя

Четвертая глава завершается анализом основных направлений дальнейших исследований. По мнению автора, наиболее перспективны следующие исследования, связанные с применением разработанной ИММ:

1. Разработка теоретического аппарата и практическая реализация ИнИС, использующих разработанную ИММ в качестве компонента алгоритмического и метрологического обеспечения измерений.
2. Разработка алгоритмов количественной оценки показателей качества схемы резания и алгоритмов параметрической оптимизации схем резания.
3. Разработка формального аппарата оценки качества операции зубофрезерования и оптимизации технологических параметров обработки с применением ИММ.
4. Основанная на результатах экспериментальных исследований и имитационного моделирования структурно-параметрическая идентификация

динамических моделей параметров процесса зубофрезерования в форме (1).

Таким образом, предлагаемая ИММ процесса зубофрезерования является средством решения достаточно широкого класса задач проектирования и эксплуатации зуборезного инструмента. Разработанный формальный аппарат может использоваться как при создании ИНИС, так и при решении задач автоматизированного проектирования зуборезного инструмента и операций зубофрезерования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проведения диссертационного исследования получены следующие результаты:

1. Разработан метод представления червячной фрезы математической моделью, отражающей основные геометрические характеристики инструмента.
2. Разработан новый метод определения параметров слоя, срезаемого любым зубом червячной зуборезной фрезы в любой момент времени обработки.
3. Разработана ИММ геометрических параметров процесса червячного зубофрезерования, которая отличается от предложенных ранее моделей значительно большей универсальностью. В отличие от имеющихся работ, модель предназначена для моделирования процесса обработки фрезами на основе эвольвентных, архимедовых и конволютных червяков; однозаходными и многозаходными фрезами; фрезами с осевыми и винтовыми стружечными канавками; фрезами, имеющими модификацию профиля зуба или протуберанец; может использоваться для моделирования процесса обработки со встречной/попутной, диагональной, тангенциальной, радиальной подачей; для моделирования процесса обработки прямозубых и косозубых колес фрезами как со стандартной, так и с измененными схемами резания. Кроме того, ИММ позволяет производить моделирование как периодов врезания фрезы в заготовку и выхода фрезы из заготовки, так и периода установившегося резания.

4. Разработан программный комплекс автоматизированного проектирования и моделирования зубчатых передач, червячных зуборезных фрез и зубофрезерных операций «ФРЕЗА».
5. Проведено тестирование корректности и надежности предложенных алгоритмов моделирования. Подтверждена их формальная корректность и эффективность для технологически допустимых конструкций фрез и условий обработки.
6. Обоснована возможность и необходимость применения имитационного моделирования при использовании ИНИС в структуре систем управления параметрами процесса червячного зубофрезерования.
7. Предложена структура ИНИС динамических параметров процесса червячного зубофрезерования, основанная на применении разработанной ИММ.
8. Обоснована возможность и предложены методы использования ИММ при оптимизации конструкции червячных зуборезных фрез и оптимизации технологических операций зубофрезерования.

Содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Токарев В.В., Скребнев Г.Г. Математическое моделирование процессов резания, режущего инструмента и АСНИ: Учебное пособие / ВолгГТУ. – Волгоград, 1998. – 72 с.
2. Токарев В.В. Управление технологическими параметрами в процессе зубообработки // Тезисы докладов I межвузовской научно-практической конференции студентов и молодых ученых Волгоградской области. Выпуск «Новые промышленные техника и технологии. Компьютерное обеспечение и компьютерные технологии» / ВолгГТУ. – Волгоград: Перемена, 1994. – С.148–150.
3. Червячные зуборезные фрезы: Учебное пособие / В.В.Токарев, Г.Г.Скребнев, А.Т.Нарожных и др./ ВолгГТУ. – Волгоград, 1998. – 137 с.

Василий Владимирович Токарев

ИМИТАЦИОННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА
ЧЕРВЯЧНОГО ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ.
МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И
АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Заказ № 390. Подписано в печать 13.05.98.

Усл.печ.л. 1.0. Формат 60×84 1/16. Тираж 100 экз.

Печать офсетная.

Волгоградский государственный технический университет.

400066 Волгоград, просп. Ленина, 28.

РПК «Политехник» Волгоградского государственного
технического университета.

400066 Волгоград, ул. Советская, 35.