

М 497803

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им.Н.Э.БАУМАНА
МГТУ

· На правах рукописи

ТАРАМЫКИН Юрий Павлович

УДК 621.833:621.914.3-529.001.24(043.3)

КОМПЛЕКСНОЕ ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ
ЗУБОФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ НА ОСНОВЕ ЧПУ

Специальности: 05.03.01 - Процессы механической и физи-
ко-технической обработки,
станки и инструмент;

05.13.07 - Автоматизация технологических
процессов и производств (про-
мышленность).

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Москва 1991

Иванов

Работа выполнена в Московском автомобилестроительном институте (ВТУЗ - ЗИЛ).

Официальные оппоненты:

доктор технических наук
доктор технических наук, профессор
доктор технических наук, профессор

- ХЛЕБАЛИН Н.Ф.
- СОСОНКИН В.И.
- АЛЕКСЕЕВ К.Б.

Ведущая организация:

Вильнюсский станкостроительный завод имени 40-летия Октября,
г. Вильнюс.

Защита состоится "12" июня 1991 г. в 14 час. 30 мин. на заседании специализированного совета Д 053.15.04 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005 Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат, заверенный печатью, просим направить по указанному адресу на имя учёного секретаря специализированного

ся в библиотеке Московского
ерситета им. Н.Э. Баумана.

май 1991 г.

5.04

Б.А. Усов

Б.А. УСОВ

М497803

Работа посвящена решению проблемы совершенствования конструкций зубофрезерных станков (ЗФС) на основе ЧПУ, обеспечивающего повышение показателей технического уровня и производственной гибкости на стадии проектирования и что связано с решением ряда научных задач, имеющих большое практическое значение.

Автор защищает комплекс научных положений, методов и теоретических исследований, направленных на создание новых кинематических структур (КС) ЗФС и отличающихся от традиционных функционально-модульным построением с учётом специфики ЧПУ, особенностей формообразования и простоты технической реализации.

Разработанные методы расчёта, проектные рекомендации, программные единицы и алгоритмы используются в конструкторской практике ряда станкозаводов при создании новых моделей ЗФС с ЧПУ и высокопроизводительных инструментов для зубообработки.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В свете основных задач, стоящих перед отечественным станкостроением по техническому перевооружению машиностроения, повышение качественных показателей технологического оборудования составляет одно из важнейших направлений. Совокупность значений этих показателей, соотнесённых к достигнутым, характеризует технический уровень ЗФС, в целом определяемый физической реализацией КС - способом и средствами подвода необходимой для формообразования мощности в зону резания.

Принципы построения КС и её конструктивные признаки (количество источников мощности для осуществления элементарных формообразующих движений; элементный состав, пространственная разветвлённость и протяжённость тракта подвода мощности; конфигурация и механическая замкнутость и т.п.) определяют главные качественные показатели ЗФС - кинематическую точность, динамические свойства, производительность и производственную гибкость. Тесные логические связи КС со множественными показателями качества указывают на целесообразность комплексного рассмотрения проблемы повышения технического уровня ЗФС.

Несмотря на эффективность применения принципов и средств ЧПУ для решения задач подобного рода, использование их в ЗФС сдерживается отсутствием строгих методов синтеза КС в новых условиях функционирования с гибким управлением. Это усугубляется недостаточной формализацией проектных и расчётных процедур, нерешённос-

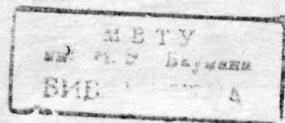
НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1497803

Тарамыкин Ю. П. Комплексное

I



тью некоторых теоретических вопросов структурообразования при соответствующей точности многокоординатного синфазного движения.

Новые подходы к проектированию КС²ЗФС на основе ЧПУ предусматривают применение такого математического аппарата, который обеспечивает высокий уровень формализации представления синтезируемых физических структур и сопутствующих явлений при функционировании с целью оптимизации принимаемых технических решений и, в то же время, наиболее быстро приводящего к искомому результату. Наиболее эффективное решение этих задач достигается посредством использования современных понятий вычислительной математики и концепций программирования.

На перспективность развития этого направления указывают работы по созданию ЗФС с ЧПУ в ФРГ, США, Японии и в других странах.

В диссертации обобщены и развиты результаты работ, выполнявшихся с 1970 г. в ЭНИМС и МАСИ лично автором и при его непосредственном участии, и направленных на совершенствование ЗФС и методов проектирования для эффективного решения функциональных задач в условиях различной интеграции производства. Содержание работы согласуется с программой решения научно-технических проблем ГКНТ при СМ СССР на 1981-1985 г.г., проблема О.16.05 "Создать и освоить в производстве металлорежущие станки с числовым программным управлением на основе применения микроэлектронной техники, а также участки с централизованным управлением, в том числе от ЭВМ, на базе этих станков с целью повышения производительности труда при обработке деталей машин в условиях мелкосерийного и серийного производства в 3,5 - 5,0 раз".

Цель работы - комплексное повышение качества и технического уровня ЗФС на основе ЧПУ по важнейшим критериям конструктивных и эксплуатационных показателей за счёт совершенствования принципов построения и организации КС, учитывающих электромеханические, информационные и управленческие характеристики при одновременном расширении технологических возможностей ЗФС и адаптируемости к изменяющимся условиям производства.

Анализ большого количества конструкций ЗФС показывает, что существующая методология проектирования КС исключает возможность достижения поставленной цели в желаемом объёме, определяя необходимость решения следующих основных задач:

- установление аналитических связей между параметрами наладки ЗФС и условиями правильной сопряжённости в станочном зацеплении исходя из реальных характеристик пары и определение разрешающей

способности отсчётных устройств механизмов наладки;

- создание формализованной системы процедур проектирования схем формообразования и технологической подготовки зубообработки;

- создание методического аппарата анализа и синтеза КС ЗФС блочно-функционального построения, учитывающего особенности структурообразования и управления;

- разработка принципов организации ЧПУ ЗФС и специализированного программно-математического обеспечения (ПМО) для автоматической реализации кинематических и технологических алгоритмов и алгоритмов управления;

- разработка методики проектирования и расчётов программируемых корректирующих устройств (ПКУ) для прецизионных ЗФС;

- разработка программных средств обеспечения расчётов на ЭВМ.

Методы исследования. В основе работы лежат представления о превалирующей роли КС и её физической реализации как о системе, определяющей качество функционирования ЗФС и формообразования в присутствии возмущающих и управляющих воздействий.

В теоретическом отношении диссертация опирается на научные положения технологии машиностроения, классические методы механики, теории механизмов и машин, теории автоматического регулирования, теории матриц и теории графов. Из специальных научных дисциплин привлечены теория зубчатых зацеплений, кинематика станков, теория резания металлов.

При разработке ПМО расчётов использованы методы вычислительной математики и структурного программирования (модульный принцип, пакетная реализация программ, макропрограммирование).

Адекватность математических моделей (ММ) и достоверность ряда расчётных зависимостей выявлялись методами численного и аналогового моделирования с привлечением результатов других исследователей и натурных экспериментов.

Научная новизна работы состоит в разработке методических основ проектирования и расчёта прогрессивных структурообразований ЗФС, обеспечивающих комплексное повышение технического уровня последних. Получены следующие новые научные результаты:

- разработан метод автоматизированных исследований и оптимизации расчётных параметров наладки ЗФС по критериям правильной сопряжённости станочной пары, отличающийся от известных методов глубокой формализации систем уравнений, универсальностью и относительной простотой математического аппарата и реализованный в виде вычисли-

тельных алгоритмов и программ. Эти элементы являются составляющими управляющей программы (УП), komponуемой непосредственно у станка для обеспечения предусмотренной гибкости функционирования;

- для класса зубчатых поверхностей разработан универсальный метод исследования и решения задач формообразования способом огибания, основой которого в теоретическом отношении является понятие метапеременной; её формальное введение способствует использованию современного аппарата вычислительной математики и концепций программирования. При этом имеется возможность анализа технической реализации КС на соответствие требованиям точности обработки, технологических возможностей ЗФС и сопряжённости со средствами ЧПУ;

- на основании качественного анализа КС традиционных построений сформирована обобщённая функционально-модульная КС ЗФС с ЧПУ, обеспечивающая наиболее полное использование энергетических возможностей электроприводов. Для анализа и синтеза подобных структур используются методы теории графов, на базе которой получены ММ состояния КС, решаемые численными методами с использованием ЭВМ.

Алгоритмы структурно-параметрической оптимизации КС при выбранном критерии оптимальности отображён целевой функцией, нахождение которой является задачей нелинейного программирования с ограничениями и требует для своего решения итерационных методов одно- или многомерного поиска (методы Рунге-Кутты, Адамса, Хэмминга и др.);

- предложен единый принцип автоматизации ЗФС функционально-модульного построения посредством УЧПУ на основе микроЭВМ с выделением ведущей координаты и с блоком коррекции точности синфазного движения, для чего разработано специальное ПМО, обеспечивающее формирование типовых технологических циклов и автоматический расчёт параметров наладки и настройки КС, разработан входной язык потребителя высокого уровня, обобщённый и частные алгоритмы функционирования ЗФС с ЧПУ; предусмотрена их унификация для зубофрезерных модулей (ЗФМ) и возможность расширения функций;

- разработана структура и методы расчёта ПКУ для подавления систематических кинематических погрешностей прецизионных ЗФС посредством дискретного задания программы корректирования при ступенчатой отработке функции несоответствия на ограниченном числе точек, чем устраняется необходимость в сменных копирах и повышается точность корректирования; сформулированы и доказаны теоремы, способствующие оптимизации величины дискреты аппроксимации и оценке точности корректирования при программировании с упреждением; решена задача нахождения оптимальных параметров цикла отработки сигнала корректиро-

вания по критерию точности при допусаемом быстродействии; приведён аналитический метод расчёта общей и составляющих погрешности ПКУ, обусловленных совместным влиянием управляющего воздействия, собственных ошибок и шумов;

- расчётно-экспериментальные исследования отражают специфические требования к характеристикам конструктивных компонентов ЗФС с ЧПУ для обеспечения требуемого технического уровня; ряд технических решений защищён авторскими свидетельствами;

- автоматизация расчётных процедур в режиме диалога с ЭВМ повышает качество проектных решений, сокращает время проектирования.

Практическая ценность работы имеет два аспекта.

На стадии проектирования выполняются расчёты параметров сопряжения станочной пары и определяются требования к точности наладки и к отсчётным устройствам для её выполнения; рассчитываются кинематические параметры функциональных механизмов; синтезируется КС и обосновываются параметры конструктивных элементов и механизмов в целом; выбираются энергетические характеристики приводов, взаимосвязанных через процесс резания; определяются технические параметры измерительных преобразователей исходя из желаемой точности синфазного движения; разрабатывается ПМО, обеспечивающее достижение требуемой производственной гибкости при заданной номенклатуре подлежащих обработке зубчатых изделий.

При проектировании ПКУ определяются оптимальные по точности параметры цикла отработки сигнала корректирования, требуемое быстродействие и энергетические параметры привода; вычисляется дискретность аппроксимации функции несоответствия и необходимый объём памяти ОЗУ; рассчитывается величина общей погрешности корректирования и её основные составляющие; находятся конструктивные и компоновочные параметры ПКУ.

В процессе эксплуатации ЗФС с ЧПУ на основе разработанных прикладных программ формируется информационный фонд классификации зубчатых изделий и зубообрабатывающих инструментов по формализованным геометрическим признакам; решаются задачи технологической подготовки зубообработки, профилирования и правки инструмента и, как следствие, подналадки ЗФС. Результатом выполнения этих мероприятий является сокращение времени на подготовку ЗФС с ЧПУ к работе, вспомогательное и подготовительно-заключительное время, повышается эксплуатационная надёжность станков и ремонтпригодность. При этом в среднем на одну степень точности повышается кинематическое качество

обработки согласно ГОСТ 1643-81 и существенно расширяется область применения станков в промышленности, включая автоматизированные производства по изготовлению зубчатых изделий.

Реализация результатов работы.

1. Для завода им. 40-летия Октября (г. Вильнюс) выполнены проектные расчёты на ЭВМ винтовых делительных пар взамен червячных к ЗФС мод. 5303ТП и 53А05ТП; при проектировании КС с высокомоментными электродвигателями ЗФС с ЧПУ мод. 53В10ВФ4 и 53В08ВФ4 в значительной мере использованы приводимые в работе рекомендации.

2. В конструкторской практике завода "Комсомолец" (г. Егорьевск) при проектировании зубчатых передач на ЭВМ используются приводимые в работе расчётные методики и программные модули.

Принципы и методика структурообразования нашли применение при проектировании КС гибкого ЗФМ мод. ЕЗ-5332Ф4М. Результаты работы использованы в части разработки специального ПМО для формирования УП.

3. Основные теоретические положения и методика проектирования ПКУ реализованы в конструкции, используемой в мастер-станке мод. 543 завода "Станкоконструкция" (г. Москва), причём обеспечивается повышение точности обработки червячных колёс в среднем в два раза.

4. Принципы адаптивного управления подачей реализованы в ЗФС мод. 5Б312, изготавливаемом заводом им. Коминтерна (г. Витебск).

5. Научные положения работы использованы отделами № 7 и № 50 ВНИМС при моделировании и расчёте параметров поверхностей глобидных кулаков и траекторий движения инструмента для фрезерного станка мод. МА655БФ4 с управлением от ЧПУ типа МС2101. При этом алгоритмы аналогичны таковым при формообразовании зубчатых изделий и позволяют автоматизировать процедуру разработки УП при заданных технологических решениях.

6. На ЗИЛе им. И.А. Дыхачёва выполнены расчёты геометрии дисковых шевров новых конструкций для работы в условиях массового производства и удовлетворяющих требованиям повышенной стойкости и производительности резания.

7. Теоретические положения и результаты работы использованы в инструкциях, методических рекомендациях и нормативных материалах: "Общемашиностроительные нормативы режимов резания, норм износа и расхода зуборезного инструмента при обработке конструкционных углеродистых сталей и чугунов" (1986 г.); "Пакет прикладных программ для расчёта зубчатых зацеплений, зубообрабатывающего инструмента и наладок зубообрабатывающих станков" (1986 г.); "Расчёт и проектиро-

вание кинематических схем технологического оборудования" (1987 г.); "Расчёт инструмента и карт наладок для обработки зубчатых эвольвентных и червячных колёс на станках с ЧПУ" (1988 г.), а также в книге "Проектирование и расчёт металлорежущего инструмента на ЭВМ", Высшая школа, 1991, 26 печ.л.

Апробация работы и публикации. На разных стадиях выполнения работы её материалы докладывались и обсуждались на: республиканской научно-технической конференции "Проблемы совершенствования малогабаритных зубофрезерных станков" (Вильнюс, 1975 г.); всесоюзной научно-технической конференции "Научно-технический прогресс в программном управлении машинами" (Одесса, 1977 г.); всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы создания и эксплуатации систем ЧПУ для металлообрабатывающего оборудования на основе микропроцессоров" (Ульяновск, 1982 г.); секции зубчатых передач и редукторостроения ЦП ВНТОмаш (Москва, 1982 г.); республиканской конференции "Применение технологического оборудования с ЧПУ для автоматизации производства в машиностроении" (Киев, 1982 г.); всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы создания и эксплуатации гибких автоматизированных систем в машиностроении" (Вильнюс, 1984 г.); III всесоюзной конференции "Проблемные вопросы автоматизации производстве" (Минск, 1984 г.); всесоюзной научно-технической конференции "Несущая способность и качество зубчатых передач и редукторов машин" (Алма-Ата, 1985 г.); III всесоюзной конференции "Современные проблемы двигателей и энергетических установок летательных аппаратов" (Москва, 1986 г.); всесоюзной научно-технической конференции "Современные проблемы технологии машиностроения" (Москва, 1986 г.); IV всесоюзном научно-техническом симпозиуме "Проблемные вопросы автоматизации производства" (Воронеж, 1987 г.); всесоюзной научно-технической конференции "Зубчатые передачи: современность и прогресс" (Одесса, 1990 г.) и других.

По материалам диссертации опубликованы 45 печатных работ, в том числе книга (в соавторстве) и 7 авторских свидетельств на изобретения.

Структура и объём работы. Диссертация оформлена в одном томе и состоит из введения, семи глав и заключения (основных результатов работы); изложена на 230 страницах машинописного текста, содержит 94 рисунка, 17 таблиц, список литературы из 198 наименований и приложения на 68 страницах, включающего некоторые дополнения теоретического характера к основному тексту, поясняющие теоретическую часть

методические примеры и тексты программ, а также документы, подтверждающие внедрение результатов работы и их эффективность.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен ретроспективный обзор технологических возможностей и анализ развития КС ЗФС как физической системы, определяющей комплекс качественных показателей технического уровня конструкции и ее производственную функциональность.

Изучение эксплуатационных возможностей и КС ЗФС 47 моделей отечественных и зарубежных конструкций выявило необходимость расширения их функциональности в сфере производства ввиду естественного роста номенклатуры и частоты смены зубчатых изделий, поступающих в обработку. Поэтому главным обоснованием выбора ЗФС становятся уровень и комплексность автоматизации основных и вспомогательных функций, оперативность и гибкость перенастройки и переналадки, рациональное построение технологических циклов и этапов. Отметим, что комплексное решение этих задач при традиционном построении КС невозможно.

Полагая неизменным приоритет технологии зубоборотки, предлагается упрощенная методика качественного анализа вариантов КС ЗФС на начальном этапе проектирования посредством математического моделирования при помощи энергетического графа. Суть методики сводится к идентификации кинематической схемы направленными энергетическими потоками, циркулирующими в ней и образующими ребра графа с вершинами в точках разветвления или объединения этих потоков, а также в узлах трансформации и преобразования вида движения. В результате из базового энергетического графа могут быть получены частные графы, однозначно соответствующие изменению конфигурации КС в зависимости от типа обрабатываемого зубчатого изделия. Для качественного анализа подобных КС могут быть использованы законы Кирхгофа.

Формализация описания КС с использованием энергетической информации имеет целью выявление основных требований к формированию оптимальной КС ЗФС. Эти требования связаны, прежде всего, с количественной минимизацией вершин базового графа и выделением из него кинематических графов с наиболее простой топологией и индивидуальными источниками мощности. Такое построение КС позволяет наиболее полно реализовать возможности ЧПУ и обеспечить повышение технического уровня ЗФС, в целом направленного на обеспечение

желаемой производственной гибкости.

Свойственные современным конструкциям корректирующих устройств, применяемым в прецизионных ЗФС, принципиальные недостатки – временное запаздывание отработки погрешности даже при невысоком частотном диапазоне, ограничения по величине уровня компенсируемых систематических погрешностей, сложность введения информации о их характере и другие – могут быть в значительной мере устранены введением принципов ЧПУ. При этом ПКУ представляет собой автономный функциональный механизм, не входящий непосредственно в КС ЗФС и не участвующий в передаче полного энергетического потока. При таком подходе возможно решение задачи сочетания высокой точности корректирования с требуемым быстродействием, широким диапазоном параметров обрабатываемых погрешностей и оперативностью управления.

На основании анализа тенденций построения КС сформулированы цели и задачи работы, отражающие ключевые вопросы повышения технического уровня и качества проектирования ЗФС посредством ЧПУ.

Во второй главе рассматриваются элементы современной теории станочного зацепления при выполнении операции зубофрезерования с целью нахождения значений номинальных параметров статической наладки ЗФС – α_c и Σ_c . В общем случае аналогом станочного зацепления в теоретическом плане считается вращательный зубчатый механизм из двух эвольвентных геликоидов, рабочие профили которых находятся в плотном (беззазорном) контакте (касании).

Поиск номинальных условий сопряженности заключается в нахождении безусловно точечного контакта поверхностей эвольвентных геликоидов на перекрещивающихся осях. Эта задача относится к геометро-контактной, соответствующей пересечению линий зацепления в полусной т.Р₀ (в точке касания аксоидных поверхностей на линии кратчайшего м.о.р.). При этом используется уравнение $\vec{r}^{(j)} = \vec{r}^{(i)}(u_j, v_j, \varphi_j)$, $j = 0, I$ текущей контактной точки геликоидов в системе координат неподвижного пространства, определяющее характер контакта поверхностей в виде системы векторных уравнений

$$\begin{cases} \vec{r}^{(0)}(u_0, v_0, \varphi_0) = \vec{r}^{(i)}(u_i, v_i, \varphi_i) \\ \vec{e}^{(0)}(u_0, v_0, \varphi_0) = \vec{e}^{(i)}(u_i, v_i, \varphi_i) \\ |\vec{e}^{(0)}| = |\vec{e}^{(i)}| = 1, \end{cases} \quad (I)$$

где $\vec{r}^{(0),(i)}$ – трёхмерные радиус-векторы точек поверхностей эвольвентных геликоидов; $u_{0,i} = -t_{0,i} \rho_{0,i} / \sin \lambda_{0,i}$ (здесь $t_{0,i} = (z - \rho_{0,i} v_{0,i}) / \rho_{0,i}$; $v_{0,i} = \ln v \alpha_{0,i}$; $\alpha_{0,i} = \arctg \varphi_{0,i}$; $\rho_{0,i}$ – винтовой параметр; $\lambda_{0,i}$ – угол

подъема винтовой линии на основном цилиндре, $\varphi_{0,i}$ - угол поворота сопряженного геликоида), $\vec{e}^{(0),(i)} = \vec{n}_{0,i} = (u_{0,i}, v_{0,i}, \varphi_{0,i})$ - орт нормали в текущей точке контакта, 0, I - индексы, относящиеся к инструменту и заготовке соответственно. Для решения уравнения (I) используются программные модули HEWO, GEWO, ERA.

В результате последовательного преобразования системы (I) и учитывая, что в станочном зацеплении должно соблюдаться условие $v_j + \varphi_j = \eta_j = \text{const}$, $j=0, I$, получим весьма важный для практики вывод: условие совпадения нормалей касающихся эвольвентных геликоидов, определяющее наличие теоретически правильного контакта в станочном зацеплении, выполняется тогда и только тогда, когда

$$|\sigma_j| < 1, \quad j=0, I, \quad (2)$$

где $\sigma_j = \cos \eta_j$.

Анализ этого неравенства показывает, что точечный контакт существует только при строгом соблюдении $|\sigma_j| < 1$. Достаточно малое отклонение Σ_c от номинального значения приводит к изменению характера контакта. Расчет углов η_j на ЭВМ выполняется подпрограммами EE21 для прямозубых колес и EE22 для косозубых. Нахождение значений параметров в любой точке контакта эвольвентных геликоидов обеспечивается подпрограммой HCON1, а вычисление координат точек контакта в неподвижной системе координат (линии зацепления) - подпрограммой HCONT.

Автоматизированный анализ пространственного расположения линий зацепления для разноименных поверхностей зубьев определяет и положение рабочих линий, характеризующих качество формообразования. Для этого используется комплекс из подпрограмм DEWK2T, RULZ, XKR, KRT, LZAC1. При этом удается объяснить влияние параметров наладки α_c и Σ_c на формирование погрешностей обработки, а также выявить требования к технической точности соответствующих механизмов.

Математический анализ геометрии станочного зацепления используется для нахождения расчетных значений параметров наладки при вариациях параметров станочной пары.

В практике зубофрезерования встречаются три основных случая: а) заданы все параметры фрезы и изделия, находятся номинальные значения параметров α_c и Σ_c ; б) заданы все параметры фрезы и изделия, кроме X_i^* и α_c , находятся значения неизвестных пара-

метров; в) заданы те же параметры, кроме χ^* и Σ_c , находятся значения неизвестных параметров. В основе решения этих задач лежит система трансцендентных уравнений второго порядка.

Для автоматизированного расчета этих вариантов разработаны программные модули ZATC1, ZATC2, ZATC3 соответственно.

При подналадке ЗФС часто возникает необходимость вычисления разницы между заданным и теоретическим значениями α_c при некотором Σ_c , реализуемого подпрограммой-функцией FLU.

Точность наладки ЗФС при прочих равных условиях можно определить посредством контроля эвольвентного профиля зуба в торцовом сечении колеса как следствие траектории некоторой т. A_0 , принадлежащей режущей кромке фрезы. Нахождение следа этой точки в упомянутом сечении связано с решением уравнения вида $A \sin \bar{\chi} + B \cos \bar{\chi} + C \bar{\chi} + D = 0$ на отрезке $2\pi k \leq \bar{\chi} \leq 2\pi(k+1)$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Решение уравнения выполняется подпрограммой TRINA.

Встречающиеся в этой главе программные модули используются в процессе технологической подготовки зубообработки и являются основой пакета прикладных программ для расчета зубчатых зацеплений и инструмента, наладок зубообрабатывающих станков и составления УП.

В третьей главе рассматривается универсальный способ решения задачи формообразования поверхностей второго порядка методом огибания независимо от сложности формы обрабатываемой поверхности и производящей инструмента. Необходимость в разработке способа, отличающегося от трудоемких и громоздких аналитических решений, вызвана комплексом проблем, связанных с анализом и синтезом схем формообразования наиболее простым в кинематическом отношении образом. Излагаемый способ теоретически обоснован общностью проблем нахождения огибающей к семейству поверхностей при кинематической независимости параметров главного движения или подачи от движения вдоль образующей этой поверхности. Математический аппарат теории огибания в приводимой интерпретации опирается на современные вычислительные методы и методы программирования, матричный аппарат расчета кинематики формообразования и связи.

Для описания обрабатываемой поверхности используется векторная форма записи ее уравнения

$$\left. \begin{aligned} \bar{r} &= A_1^{j_1} A_2^{j_2} \dots A_n^{j_n} \bar{e}^4, \\ f_i(q_1, q_2, \dots, q_n) &= 0, \quad i=1, 2, \dots, l, \quad l=n-2, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\bar{r} = (x, y, z, 1)^T$ - обобщенный четырехмерный радиус-вектор точки обрабатываемой поверхности; $A_k^{j_k}$, $k=1, \dots, n$ - обобщенная матрица четвертого порядка, отображающая движение системы координат S_k относительно системы S_{k-1} ; j_k , $k=1, \dots, n$ - индекс, определяющий вид матрицы $A_k^{j_k}$; $f_i(q_1, q_2, \dots, q_n)$ - связи, наложенные на аргументы q_k , $k=1, \dots, n$ матриц $A_k^{j_k}$, $i=1, \dots, l$, $l=n-2$; $n=L+\tilde{m}$, причем L - число систем координат, жестко связанных с соответствующим подвижным звеном формообразующей системы станка, $\tilde{m}=0$, или 1, или 2 - размерность множества формообразующих точек инструмента (для точечной режущей кромки $\tilde{m}=0$, для лезвийной $\tilde{m}=1$, для режущей поверхности $\tilde{m}=2$); $\bar{e}^4 = (0, 0, 0, 1)^T$ - однородный радиус-вектор начала координат.

Связи f_i могут быть трех видов: 1) кинематические; 2) позиционные; 3) огибания. Поскольку уравнения (3) определяют поверхность, существуют два независимых друг от друга параметра q_{i_1} и q_{i_2} из числа $q_1, \dots, q_n$, через которые однозначно выражается радиус-вектор $\bar{r}$ посредством декартовых координат $\bar{r} = \bar{r}(q_{i_1}, q_{i_2}) = \bar{r}(u, v) = (x, y, z, 1)^T$, а также все параметры $q_j = q_j(u, v)$, где u, v - криволинейные координаты обрабатываемой поверхности.

Если $s = l+2$ при отсутствии огибания, $s = l+1$ при однопараметрическом и $s = l$ при двухпараметрическом огибании, а к связям, определяемым второй строкой системы (3), добавим формальные связи вида $f_t = 0$, $t > l$, то можно записать вспомогательные функции: кинематических $F_0 = f_1^2 + f_2^2 + \dots + f_{s-2}^2$ связей и связей $F_1 = f_{s-1}^2 + f_s^2$ огибания, причем их сумму назовем целевой функцией огибания со связями

$$F = F_0 + F_1. \quad (4)$$

Для автоматизированного перехода от неявного задания поверхности в виде (3) к векторно-параметрическому ее уравнению, что возможно ввиду унифицированной записи матриц A , необходимо автоматически продифференцировать вектор $\bar{r}$ по переменным q_j и после составления системы уравнений связей дальнейшие преобра-

зования осуществлять независимо от вектора $\vec{F}$. Решение уравнений связей выполняется численно методом поиска минимума целевой функции $F = \sum_{i=1}^N f_i^2(q_1, \dots, q_n) = 0$, причем минимум определяется по тем q_{ij} , которые отличаются от u и $\bar{u}$ и не являются константами. Число таких параметров $N = n - w - 2$, где w - число позиционных связей. Находя при заданных q_{i1} и q_{i2} абсолютный минимум функции F , однозначно определяют значения оставшихся параметров, а подстановкой соответствующих значений в первое уравнение (3) находят координаты обрабатываемой поверхности в параметрической форме.

Программно-математическое обеспечение расчетов выполнено на языке ФОРТРАН IV с применением программных макросредств. Для этого в программе предусмотрены метaperменные, под которыми понимаются идентификаторы подпрограмм, массивов, переменных или фрагментов программ. Аппарат метaperменных применен в целях получения универсальной программы для решения разнообразных задач формообразования огибанием. Определенное значение метaperменная принимает непосредственно в процессе ручной или машинной генерации программных единиц и в тексте обозначается подчеркнутым идентификатором. Применение метaperменных позволяет формализовать процесс получения систем трансцендентных уравнений $f_i = 0$ и автоматически решать их.

Рассмотрим пример построения метаподпрограммы SP(R, X) (рис.1), где используется минимально возможное число метaperменных, причем R соответствует вектору $\vec{F}$ в уравнениях (3), а двумерный массив X содержит параметры q_{i1} и q_{i2} . Для решения конкретной задачи составляется метапрограмма VOGI, вычисляющая для соответствующей совокупности значений q_{i1} и q_{i2} значение вектора $\vec{F}$. Кроме головной программы, VOGI содержит ряд метапрограмм (включая SP) и обычных подпрограмм. Основная, постоянная для данной задачи, информация передается в программные единицы через помеченную общую область /POR1/. В VOGI также входят: метаподпрограмма SUBROUTINE POMAI(N, Q, VALUE, GRAD), вычисляющая значение и градиент функции F_i ; метаподпрограмма FUNCTION DF(N, Q, I, J, K), вычисляющая при K = 0 частные производные $\partial q_{ij} / \partial q_j$ и при K > 0 частные производные $\partial^2 q_{ij} : (\partial q_j, \partial q_k)$; метаподпрограмма SUBROUTINE FUNCTP(N, ARG, VAL, GRAD), вычисляющая значение и градиент целевой функции огибания

```

SUBROUTINE SP(R,X)
-----
  DIMENSION PY(4),Y(2)
  DIMENSION QCHN,INZCH,MICHCH,OMINCH,
  * CHACHN
  * COMMON /PORT/ INZ, I1, I2, I06, J1, J2, J3, J4,
  * N, MICH, OMIN, OMAX, Q11, Q12
  .....
  RETURN
END

```

Рис.1.

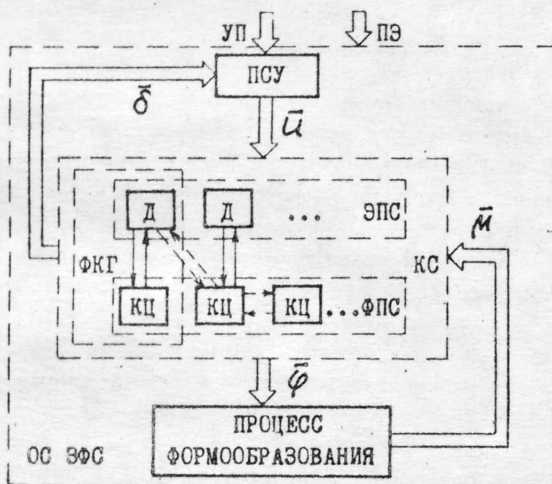


Рис.2

ПЭ - подвод энергии;
 ПСУ - подсистема управления;
 Д - двигатель;
 ЭПС - энергетическая подсистема;
 ФКГ - функциональная кинематическая группа;
 δ - вектор обратных связей;
 u - вектор управляющих воздействий;
 φ - вектор кинематических параметров;
 m - вектор силовых параметров.

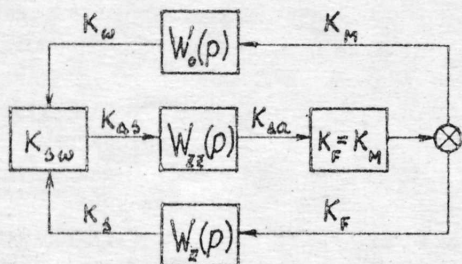


Рис.3

$K_{\Delta\omega} = (K_s - K_\omega) / (1 + K_\omega)$;
 $K_{\Delta s}$ - относительное изменение приращения величины подачи на оборот фрезы;
 $K_{\Delta a}$ - относительное изменение толщины среза.

и другие.

Минимум функции F по уравнению (4) находится по методу Давидона (подпрограмма FMFP) или сопряженного градиента (подпрограмма FMCG). Первое приближение для входа в эти подпрограммы задается или находится при помощи генератора случайных, равномерно распределенных чисел (подпрограмма RANDU). Последние три подпрограммы берут из пакета научных подпрограмм, входящих в состав математического обеспечения отечественных ЭВМ серии ЕС. В результате решение задачи огибания сводится к написанию тел двух достаточно простых метаподпрограмм (POMA1 и DF) и к присвоению значений 16 метапеременным. Эта процедура легко осуществляется современными макросредствами.

Предложенный способ позволяет автоматически получать уравнение обрабатываемой поверхности и устанавливать весь комплекс ее геометрических характеристик. Приведен пример решения подобной задачи.

В четвертой главе изложены методологические основы синтеза и анализа КС ЗФС нового структурообразования на основе формального построения математических моделей (ММ) структуры графааналитическими методами.

Использование системного подхода к задачам анализа и синтеза КС позволяет рассматривать ее с позиции единства трех подсистем: энергетической, формообразующей и управляющей. Из них первые две целесообразно объединить и рассматривать совместно в силу близости протекающих в них физико-механических процессов в режиме функционирования. Обобщенная структура (ОС) ЗФС представлена на рис. 2.

С целью систематизации и создания необходимой методической основы для разработки и развития методов проектирования КС приведена их классификация, причем КС могут характеризоваться одновременно несколькими признаками. Дальнейшее развитие классификации КС возможно на основе фасетного принципа.

Задача синтеза КС ЗФС рассматривается как задача определения выходных характеристик некоторой физически реализуемой технической системы при заданном составе и соединении ее элементов, сгруппированных по некоторому правилу и обеспечивающих функцию формообразования. Выходными характеристиками структуры могут быть, например, показатели мощности, передаваемых моментов, скорости

звеньев и т.п.

Разработка желаемой структуры ЗФС содержит две стадии, на первой из которых создается графическая модель объекта проектирования в символической форме (схематизация), например, в виде энергетического графа, кинематической схемы и т.п., на второй — динамическая модель системы в виде математического описания, на основании которой осуществляется итеративный поиск параметров системы. В зависимости от закономерностей связей между параметрами и поведением КС во времени, функционально-динамические свойства механизмов описываются детерминированными и стохастическими ММ. Последние применяются в тех случаях, когда эти закономерности имеют вид корреляционных связей. Выбор метода математического описания КС определяется условиями задачи, требованиями, предъявляемыми к процедуре составления ММ и к ее свойствам, способам составления расчетной схемы и уровнем ее абстракции.

Конечной целью структурно-параметрического анализа (синтеза) КС является сравнение найденных характеристик с их допустимыми значениями и принятие решения о завершении этой процедуры.

Для проведения структурно-параметрического синтеза КС в данной главе использованы граф-аналитические методы, обеспечивающие достаточно высокие уровни формализации описания и простоту анализа и синтеза. Для формирования ММ КС применяются методы графов связей и методы полюсных графов, являющиеся более информативными по сравнению с методами классической механики.

В то же время, метод графов связей, в основу которого положен принцип анализа потоков энергии между взаимосвязанными элементами системы, независимо от физической природы и сложности позволяет посредством четырех переменных состояния и восьми типовых элементов (примитивов) однозначно описывать структуры систем со многими степенями свободы. Этот метод основывается на принципе физических аналогий, что при определенных условиях может привести к нарушению принципа изоформизма между реальной системой и ее ММ, а, следовательно, к качественно неверным результатам. Для удовлетворения требованиям изоформизма используется метод полюсных графов.

Основу метода составляет принцип топологической интерпретации физических переменных в виде двухвершинного ориентированного

графа как способа получения количественной оценки переменных, характеризующих физические свойства компоненты, причем переменные условно делятся на параллельные $\tilde{X}$ и последовательные $\tilde{Y}$ согласно способу их измерения. Математическое описание расчетной схемы КС строится путем объединения двухвершинных ориентированных графов в общий граф системы, отражающий ее структуру, совокупность переменных и их связей между собой. Уравнения связей и полюсные уравнения компонент образуют в совокупности систему уравнений, характеризующих динамическое состояние системы – интегрально-алгебро-дифференциальных уравнений, которые решаются известными способами.

Практически синтез КС ЗФС реализуется следующим алгоритмом.

1. Составляется расчетная графическая схема структуры и выделяются типовые компоненты с известными полюсными характеристиками.
2. Строится граф структуры посредством объединения полюсных графов компонент и присоединения к ним полюсных графов внешних воздействий – кинематических и силовых. Выделяется лес (дерево) графа, представляющий собой подграф со всеми вершинами графа без контуров. Дерево графа делит дуги графа на ветви и хорды.
3. Записываются матрицы полюсных уравнений компонент структуры

$$A \begin{Bmatrix} \tilde{X}_{\delta 2} \\ \tilde{X}_{x_1} \end{Bmatrix} = B \begin{Bmatrix} \tilde{Y}_{\delta 2} \\ \tilde{Y}_{x_1} \end{Bmatrix}, \quad (5)$$

где A, B – матрицы коэффициентов полюсных уравнений; $\tilde{X}_{\delta 2}, \tilde{Y}_{\delta 2}$ – неизвестные параллельные и последовательные переменные ветвей графа расчетной схемы; $\tilde{X}_{x_1}, \tilde{Y}_{x_1}$ – то же хорд графа расчетной схемы.

4. Составляются уравнения:

фундаментальных контуров

$$\begin{Bmatrix} \tilde{X}_{\delta 2} \\ \tilde{X}_{x_1} \end{Bmatrix} = C \begin{Bmatrix} \tilde{X}_{\delta 1} \\ \tilde{X}_{\delta 2} \end{Bmatrix}, \quad (6)$$

где $C = \begin{Bmatrix} 0 & 1 \\ -C_{11} & -C_{12} \end{Bmatrix}$, здесь C_{11}, C_{12} – подматрицы матриц коэффициентов, состоящие из чисел 1, -1, 0; $\tilde{X}_{\delta 1}$ – заданные параллельные переменные, соответствующие ветвям графов;

уравнений отсечений

$$\begin{Bmatrix} \tilde{Y}_{\delta 2} \\ \tilde{Y}_{x_1} \end{Bmatrix} = D \begin{Bmatrix} \tilde{Y}_{x_1} \\ \tilde{Y}_{x_2} \end{Bmatrix}, \quad (7)$$

где $D = \begin{bmatrix} -D_{21} & -D_{22} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, здесь D_{21} , D_{22} — подматрицы матриц коэффициентов, состоящие из чисел 1, -1, 0; $\tilde{Y}_{x_2}$ — заданные последовательные переменные, соответствующие хордам графа.

5. Выбирается дерево графа, на основании которого устанавливается состав переменных, подлежащих замене в уравнениях компонентов (например, переменных $\tilde{X}_{x_1}$ и $\tilde{Y}_{\delta_2}$) и которые находятся на основании фундаментальных контуров и отсечений графа расчетной схемы.

6. Записываются уравнения состояния КС путем подстановки уравнений (6) и (7) в уравнение компонент (5). После преобразования

$$AC\tilde{X}_t = BD\tilde{Y}_x, \quad (8)$$

где $\tilde{X}_t = \begin{bmatrix} \tilde{X}_{t1} \\ \tilde{X}_{t2} \end{bmatrix}$, $\tilde{Y}_x = \begin{bmatrix} \tilde{Y}_{x1} \\ \tilde{Y}_{x2} \end{bmatrix}$

Число обыкновенных дифференциальных или алгебро-дифференциальных уравнений вида (8) равно числу полюсных уравнений компонент, которые могут быть получены матрично-топологическим или топологическим методами. В последнем случае получение ММ КС заключается в подстановке в уравнение (5) вместо $\tilde{X}_{x_1}$ и $\tilde{Y}_{\delta_2}$ их значений

$$\begin{aligned} \tilde{X}_{x_1} &= -C_{11}\tilde{X}_{t1} - C_{12}\tilde{X}_{t2}, \\ \tilde{Y}_{\delta_2} &= -D_{21}\tilde{Y}_{x1} - D_{22}\tilde{Y}_{x2}, \end{aligned} \quad (9)$$

которые называются контурными и узловыми уравнениями соответственно.

Высокий уровень формализации и простота полученных формул позволяют расширить возможности анализа и синтеза конструктивных решений КС посредством автоматизации процедуры проектирования на ЭВМ, особенно на заключительных этапах.

Проведение структурно-параметрической оптимизации КС выполняется в следующей последовательности: определение или конкретизация целевой функции для выбранного критерия; выбор метода оптимизации; составление численных алгоритмов оптимизации; численное решение задачи оптимизации; выводы и практическая реализация.

Целевая функция $F'(X)$ базируется на структурном или параметрическом описании КС в соответствии с ММ. Выбор метода оптимизации определяется условиями задачи. Класс задач, аналогичных поставленной, в канонической форме формулируется следующим образом:

$$F(\bar{X}) = \min_{\bar{X} \in D}, \quad \bar{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (10)$$

при наличии ограничений $R_k(\bar{X}) \geq 0$, $k = 1, 2, \dots, K$; $R_L(\bar{X}) = 0$, $L = 1, 2, \dots, L$, где $\bar{X}$ - вектор-столбец заданных проектных переменных; n - число этих переменных; $R_k(\bar{X})$ - K нелинейных ограничивающих функций, выделяющих области варьирования допустимых значений переменных в заданном пространстве параметров; $R_L(\bar{X})$ - L нелинейных ограничивающих функций, сокращающих число возможных вариантов при определенных комбинациях заданных проектных переменных.

В такой постановке задача оптимизации КС является задачей нелинейного программирования с ограничениями на основе итерационных методов одно- или многомерного поиска.

Важный вопрос при решении задач параметрического синтеза возникает при определении силовых взаимодействий, обусловленных схемой резания. Наиболее сильными являются связи, определяющие толщину среза - между главным движением и продольной (радиальной) подачи. На основе положения В.А.Кудинова о замкнутости динамической системы станка, ММ зубофрезерования рассматривается с учетом допущения, не противоречащих его физическому аналогу: рассматривается модель резания "по следу"; высокочастотные колебания при резании в зоне контакта инструмента и заготовки не влияют на основные зависимости силы резания от параметров режима обработки; механические элементы являются фильтрами высокочастотных автоколебательных процессов при резании, превышающими их собственные частоты на порядок и более; при обработке компоненты силы резания связаны между собой и моментом линейной зависимостью; ММ ЗФ учитывает крутильные деформации механизмов.

При наличии упругих деформаций ЗУС текущая фактическая толщина среза определяется формулой

$$a(t) = K_a Z_{\infty}(t) \sin \varphi_{\infty}(t), \quad (11)$$

где $K_a = \varphi_p q_p / (2\pi)$, здесь φ_p - угол резания каждым зубом фрезы, q_p - число реек фрезы; $Z_{\infty}(t)$ - фактическое положение оси фрезы в направлении подачи; $\varphi_{\infty}(t)$ - фактическое положение режущей кромки зуба рейки по углу поворота фрезы.

Периодическое изменение толщины среза вызывает колебание сил резания и величин линейных и угловых скоростей (известное в технике как "наброс нагрузки") и оказывают существенное влияние на протекание динамических процессов в станках.

Силловые взаимодействия приводов главного движения и подачи определяются через приращение фактического толшины среза в оперативной форме

$$\Delta \alpha(\rho) = K_a \Delta Z_{xx}(\rho) \sin \Delta \varphi_{op}(\rho) W_{zz}(\rho), \quad (12)$$

где $\Delta Z_{xx} = \Delta Z_{op} / \cos \beta_1$ — фактическое приращение величины подачи вдоль направления зуба (здесь ΔZ_{op} — фактическое положение оси фрезы в направлении подачи); $\Delta \varphi_{op}$ — фактическое приращение угла поворота фрез; $W_{zz}(\rho)$ — передаточная функция силы резания вдоль направления зуба изделия.

Возмущения от нагрузок для главного привода и подачи в этом случае могут быть записаны в безразмерной форме через передаточные функции

$$W_o(\rho) = \cos \lambda_o K_w(\rho) / K_m(\rho); \quad W_z(\rho) = K_s(\rho) / K_F(\rho), \quad (13)$$

где K_w — относительное изменение скорости главного привода; K_s — относительное изменение скорости привода подачи; $K_F = K_m = \sin 2\alpha_o / (2\alpha_o - 1)$ — относительное изменение усилия подачи и момента силы резания на оси фрезы.

Общую структуру силовых взаимосвязей приводов, полученную на основании приведенных выше зависимостей, образуют аналогичные по структуре частные контуры, что отражено на рис. 3.

В пятой главе рассмотрены особенности построения программного управления ЗФС, обусловленные кинематикой формообразования с требуемой точностью синфазных движений, необходимостью расширения технологических функций и гибкости управления, обратно пропорциональной времени, затрачиваемому на перенастройку устройства ЧПУ для обработки нового изделия.

В простейшем случае обработки цилиндрического косозубого колеса кинематический закон формообразования описывается линейной параметрической связью между соответствующими выходными координатами

$$\varphi_c(t) = K_{bc} \varphi_B(t) \pm K_{cy} \delta_Y(t), \quad (14)$$

где $K_{bc} = K_o / Z_1$ — коэффициент настройки движения деления; $K_{cy} = \tan \beta_1 / r_1$ — коэффициент настройки движения подачи; φ_c — угол поворота стола; φ_B — угол поворота фрезы; δ_Y — прямолинейное движение подачи (индексами обозначены координаты в соответствии с рекомендациями ИОХ).

Система ЧПУ должна обеспечивать функционирование ЗФС в трех режимах: стабилизации, позиционирования и контурном, а также их сочетаний.

Фрагмент структурной схемы ЧПУ для ЗФС (рис.4) содержит координатные обратные связи по положению и микропроцессор, рассчитывающий частоту корректирующего сигнала управления координатой С для поддержания точности синфазного движения деления

$$f_k = f_{\Delta B} / i_{CB} \quad (15)$$

где $f_{\Delta B}$ - частота импульсов, генерируемых датчиком положения координаты В (вращения фрезы); i_{CB} - станочное передаточное отношение, зависящее от вида зубчатого изделия и метода зубофрезерования.

Концепция ЧПУ ЗФС следует исходя из перспектив развития гибких производств и технологии при необходимости выполнения следующих основных функций: а) автоматического настройки кинематических соотношений и наладки параметров технологического цикла с его формированием; б) обеспечения синфазного движения по пяти координатам и независимого по шести, а также движений с позиционированием при лимитируемой точности; в) реализации закона адаптивного управления, а также разгона и торможения приводов управляемых координат; г) ручного и автоматического ввода УП.

С целью упрощения процедуры разработки программно-математического обеспечения (ПМО) формируются блоки системного, группового и функционального обеспечения. Групповое ПМО организуется по модульному принципу с иерархией модулей: управление приводом главного движения - распаковка исходных данных - алгоритмы кинематических соотношений - алгоритмы технологических циклов - ввод констант и т.д.

Для формообразования цилиндрических и конусных зубчатых колес с прямыми и косыми зубьями, с выпуклой и вогнутой криволинейной образующей, червячных и некруглых получены необходимые кинематические соотношения. Требования к режиму интерполяции основываются на вычислении частот управления приводами координат. Для КС ЗФС с ведущей координатой частоты управления приводами стола f_c и подачи f_v рассчитываются в функции частоты управления f_s привода фрезы.

На основании шести базовых технологических циклов и их эта-

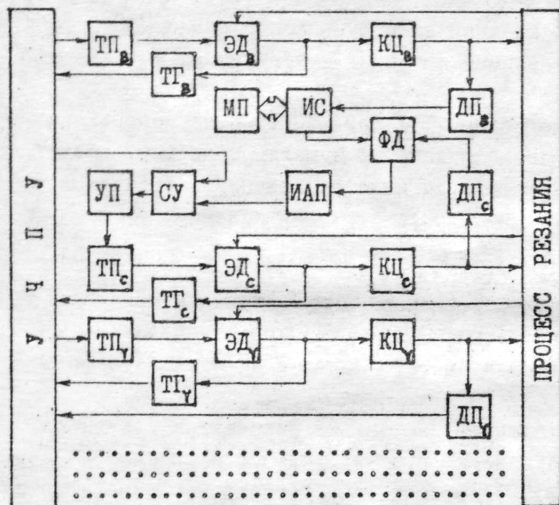


Рис.4

ТП - тиристорный преобразователь;
ЭД - электродвигатель;
ТГ - тахогенератор;
МП - микропроцессор;
ИС - интерфейс;
ДП - датчик положения;
ФД - фазовый дискриминатор;
ИАП - импульсно-аналоговый преобразователь;
СУ - суммирующий усилитель;
УП - управляемый преобразователь;
В,СУ - управляемые координаты.

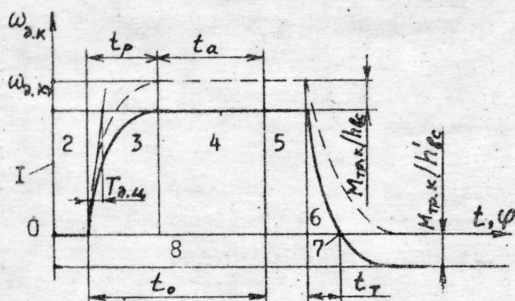
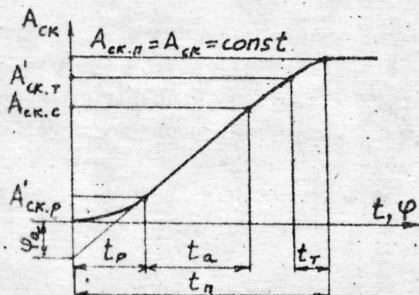


Рис.5

1 - старт; 2 - выстой;
3 - разгон; 4 - активная отработка; 5 - перебеж; 6 - торможение; 7 - стоп; 8 - зона застоя;

$$t_p = 3T_{a,4}; t_r = (J_{np}/h'_{sc}) \times \ln(k_m I_a / M_{tp,k}); t_o = \{A_{sk,c} + (k_m I_a - M_{tp,k} / J_{np}) h'_{sc}\} / (k_m \times I_a - M_{tp,k}).$$

Рис.6



$A'_{sk,p}, A'_{sk,c}, A'_{sk,r}, A'_{sk,d}$ - соответственно значения функции корректирования в конце разгона, при получении стоповой команды, в начале торможения, при полной отработке; φ_a - фазовое запаздывание начала отработки сигнала корректирования.

пов возможно получение до 73 модификаций, что охватывает обработку практически всего многообразия форм зубчатых колес.

Для получения общей для всех циклов дополнительной информации - о величинах перемещений вдоль осей координат, перебегах, врезания и т.д. в конкретных условиях обработки разработана система формальных логических признаков в зависимости от контекста, в котором используется рассматриваемая переменная.

Формирование УП для ЗФС с ЧПУ осуществляется с использованием 32 переменных и 11 константных параметров (число их зависит от типа зубчатого изделия) при наибольшем объеме памяти 21 Кбайт.

В качестве базы для проектирования зубофрезерных модулей (ЗФМ) используются ЗФС с ЧПУ и с разработанным для них ПМО с обеспечением независимости логического управления, причем взаимосвязь УП с программируемой электроавтоматикой станка наиболее эффективно решается применением программируемого командоаппарата (ПК), общающегося с устройством ЧПУ командами M, T, S для расширения функций ЗФМ и достижения желаемой гибкости управления, что оказывает прямое влияние на повышение технического уровня конструкции.

В работе приведены общие рекомендации по решению этих и других задач, в частности, по составу основных функциональных блоков и взаимной стыковке устройства ЧПУ, ПК и электроавтоматики ЗФМ. В целом предложенный подход к проектированию ЗФМ имеет техническое обоснование.

В шестой главе дается обоснование и изложение метода проектирования ПКУ прецизионных ЗФС, основанного на дискретном представлении информации о погрешностях в фиксированном конечном числе точек. Такой вывод следует из практически установленной закономерности, при которой величина систематической погрешности весьма "вяло" изменяется на периметре обработки, длина которого на несколько порядков больше величины допуска. При малом объеме информации, требуемой для данного метода корректирования, наряду с устойчивыми удается компенсировать и неустойчивые систематические погрешности, величины и характер проявления которых изменяются незначительно в пределах обработки партии или одного зубчатого изделия за несколько проходов. Теоретически метод допускает одновременное корректирование накопленной и циклической составляющих кинематической погрешности.

Функция корректирования воспроизводится на основе информа-

пии о погрешностях в рассматриваемых точках, которая задается в числовом позиционном разрядном коде. Принцип исполнения команд корректирования заключается в отработке приращений функции несоответствия (разности фактического и теоретического законов движения) на некотором участке угловых φ_c координат или на временном интервале t .

Считая, что ПКУ предназначено для компенсации 1-й гармоники функции несоответствия, линейно аппроксимированной на отрезках между двумя последовательностями команд функции корректирования $A_{ск}$ с наименьшим среднеквадратическим отклонением σ_k , можно предположить, что функция корректирования также должна иметь вид прямой, выраженной через угловую скорость электродвигателя (ЭД) ПКУ при $\omega_{э,к} = const$

$$A_{ск}(\varphi_{cl}(t)) = \int \omega_{э,к}(\varphi_{cl}, t) dt + C, \quad (16)$$

где $\omega_{э,к}$ - угловая скорость ЭД; $\varphi_{cl}(t)$ - функция изменения угловой координаты стола во времени в зависимости от величины команды корректирования, C - постоянная интегрирования.

Для нахождения энергетических характеристик ЭД при оптимальных параметрах движения корректирования рассматривается старт-стопный режим (рис.5) работы ПКУ и приводятся аналитические зависимости для каждого из этапов цикла отработки сигнала корректирования. Так, механизм корректирования достигает скорости активной отработки за время $t_p = 3T_{э,к}$, где $T_{э,к} = J_{пр}/h_{э}$ - постоянная времени ПКУ, $J_{пр}$ - приведенный к валу ЭД момент инерции ПКУ, $h_{э}$ - коэффициент вязкого сопротивления, обусловленный скоростным трением при разгоне механизма; считая время отработки $t_o \gg t_p$, получим $t_o = \{[A_{ск,с} + (K_M I_A - M_{тр,к})/J_{пр}] \times h_{э,с}\} / (K_M I_A - M_{тр,к})$, где $A_{ск,с}$ - значение функции корректирования в момент получения стоповой команды, K_M - коэффициент пропорциональности между моментом на валу ЭД и током якоря I_A , $M_{тр,к}$ - приведенный к валу ЭД момент трения механизма и т.д. Заметим, что разбивка цикла отработки на участки является практически необходимым приемом аналитического определения его параметров.

На рис.6 приведена диаграмма роста значений функции корректирования $A_{ск}$ соответственно изменению параметров цикла отра-

ботки сигнала корректирования. Наибольший практически интерес представляют значения $A_{ск}$ в точках перегиба, для которых найдены соответствующие расчетные формулы.

Аналитическое исследование поведения программируемой функции корректирования позволяет оптимизировать ее в отношении наилучшего приближения к функции несоответствия. Это условие выполняется при $d\sigma_k/dt=0$, в результате чего можно найти необходимые для этого параметры - допускаемое запаздывание t'' отработки (постоянная времени механизма ПКУ) функции корректирования и ее оптимальную крутизну $K_{кр} = \Delta A_c / \Delta t$, зависящих от тока якоря ЭД.

С целью повышения динамического качества ПКУ рассмотрен вариант функционирования в режиме постоянной закрутки (с постоянной составляющей скорости вращения ЭД). При этом номинальная величина настройки передаточного отношения гитары деления должна быть изменена на величину, пропорциональную постоянной составляющей скорости.

Показано, что для необходимого быстродействия ПКУ следует обеспечить полосу пропускания в 4 раза более широкую, чем частота циклической погрешности и на порядок более высокую собственную частоту во избежание потери устойчивости механизма. Повышение точности корректирования достигается при опережении отработки $A_{ск}$ на величину ΔA_c , соответствующую наименьшему периоду высшей гармонической составляющей и учитываемую при составлении УП.

Получены аналитические выражения для общей и составляющих погрешностей ПКУ, наиболее существенные из которых обусловлены упругими свойствами механических цепей, собственными ошибками и шумами.

В седьмой главе излагаются вопросы расчетного и экспериментального характера, возникающие в процессе конкретного проектирования ЗФС с ЧПУ и ПКУ и их компонентов. Эти примеры демонстрируют методические приемы для решения разнообразных задач.

Экспериментально апробированы на станке-стенде и проанализированы пять вариантов структур. Из них наилучшими качественными показателями обладают двухконтурные структуры с ведущей

(задающей) координатой, стабилизированной по скорости, с зависимыми следящими координатами и путевыми обратными связями, причём система измерения угла рассогласования (СИУР) и корректирующее звено включены в контур управления следящей координатой стола.

Исследование аналоговой модели следящей координаты синфазной системы выполнено на АВМ типа ЭМУ-10 с целью согласования характеристик входящих в её состав звеньев. Найдены желаемые значения постоянных времени СИУР и корректирующего звена, АЧХ системы по углу рассогласования и по возмущающему моменту на столе. Установлено, что в пределах величины зазора между элементами делительной пары от 0 до 30 мкм и в диапазоне характерных частот привода стола картина АЧХ практически неизменна.

При расчётах систем стабилизации силовых параметров приводов при зубофрезеровании, относящихся к классу адаптивных одно- или двухпараметрического типа, получены аналитические зависимости, связывающие параметры режимов резания с геометрическими характеристиками заготовки и фрезы. Приведены номограммы для определения законов изменения подачи $z_v = f(m)$ в зависимости от реальной мощности резания при $P_p = \text{const}$. Желаемый закон управления конструктивно может быть реализован аппаратно в виде локальной системы или программно штатным УЧПУ.

Для контроля, регистрации и исследования высокочастотных составляющих погрешностей зубофрезерных мастер-станков приводится методика применения кинематомеров сейсмического принципа действия совместно с гармоническим анализатором.

Показано применение метода графической оценки влияния переменных технико-экономических факторов на эффективность ЭФС с ЧПУ для нескольких вариантов основных затрат и их влияния на параметры режимов резания и производительность.

В приложении I приводятся некоторые теоретические дополнения, даны числовые примеры и экспериментальные результаты; в приложении 2 содержатся тексты основных программ для выполнения расчётных процедур на ЭВМ типа ЕС; приложение 3 включает сведения о практической реализации и внедрении результатов работы.

Основные результаты работы

I. Установлены качественные взаимосвязи показателей техни-

ческого уровня ЗФС с механическими и энергетическими характеристиками классических КС. Изменение характеристик в желаемом направлении возможно при других принципах структурообразования на основе обобщения положений теории зубчатых зацеплений, электро-механических цепей и программного управления, что является содержательной базой комплексного повышения технического уровня ЗФС на этапе проектирования.

2. Впервые путём обобщений теории зубчатых зацеплений разработан аналитический аппарат автоматизированных расчётов, исследования и оценки качества станочного зацепления при зубофрезеровании исходя из фактических параметров станочной пары. Для этого создана упорядоченная система программных модулей расчётов на ЭВМ, существенно повышающих эффективность труда исследователя.

На основании выполненных при помощи модулей расчётов определены точностные требования к механизмам наладки ЗФС и к их отсчётным устройствам при проектировании.

3. Впервые создана универсальная методика исследования и решения задач формообразования сложных поверхностей методом огибания с привлечением современных понятий вычислительной математики и концепций программирования. Используемый математический аппарат упрощает получение уравнений огибания и позволяет автоматизировать решение разнообразных задач, связанных с технологической подготовкой зубообработки и с проектированием ЗФС.

4. Предложена обобщённая КС ЗФС, построенная на основе набора функциональных электро-механических групп с гибкими связями, обеспечивающими их взаимодействие в едином технологическом процессе.

Сформирована расчётная математическая модель, формализованная посредством методов теории графов. Новая форма записи уравнений состояния системы, выполнение структурно-параметрической оптимизации, решение задач анализа и синтеза КС и других граф-аналитическими способами даёт наиболее быстрый результат.

5. Установлены закономерности силовых взаимосвязей приводов главного движения и подачи через процесс резания в виде отношения передаточных функций по нагрузке. Получены алгоритмы одно- и двухпараметрической стабилизации мощности приводов с целью повышения точности направления зуба и производительности резания.

6. Предложен единый подход к автоматизации ЗФС с различной степенью функциональности средствами ЧПУ, логически отражающий соответствие структуре с ведущей координатой. Для реализации основных функций ЧПУ разработано общее и специальное программно-математическое обеспечение. При этом предусмотрено автоматическое решение задач расчёта и ввода параметров настройки и наладки, формирования и отработки технологических циклов, включая обработку конусных, некруглых, колёс с криволинейной образующей и блок-шестерён, синфазного движения и позиционирования исполнительных механизмов, проверки готовности ЗФС к работе и других.

Выполнена алгоритмизация технологических операций, управления приводами исполнительных органов и функционирования ЗФС. В обобщённом алгоритме управления станком выделены приоритетные задачи - разгон и торможение приводов, выбор вида интерполяции (линейной, круговой), распаковка исходных данных, ввод и т.д.

7. Разработана структура ПКУ для прецизионных ЗФС, обеспечивающего совместное подавление накопленной и циклической составляющих кинематической погрешности посредством дискретного задания программы корректирования при ступенчатой отработке функции несоответствия. Найдены оптимальные параметры цикла отработки сигнала корректирования в заданной точке и показана целесообразность программирования с упреждением.

8. Приведена методика аналитического расчёта общей погрешности ПКУ и её составляющих, среди которых выделяются порождаемые упругими свойствами механических элементов, ошибками изготовления и шумами, которые могут превосходить корректируемые.

Приводятся зависимости, необходимые для определения основных конструктивных параметров ПКУ.

9. Выполнен ряд исследований расчётно-экспериментального характера с целью иллюстрации практического подхода к проектированию и определению характеристик конструктивных компонентов ЗФС с ЧПУ. В составе решённых вопросов - рекомендации по функциональному составу структуры, исследование элементов следящего привода стола, выявление влияния величины зазора в делительной паре на АЧХ электромеханической цепи, определение технических и метрологических требований к путевым измерительным преобразователям, выявление источников высокочастотных составляющих погрешностей кинематомерами сейсмического типа и другие.

Основные положения и результаты работы используются в учебном процессе и в учебно-методической литературе для студентов высшей школы по специальностям I201 и I202, в нормативных и методических материалах, применяются в конструкторской практике станкозаводов.

Основные работы автора по теме диссертации

1. Тарамыкин Ю.П., Цейтлин А.С. Применение инерционных кинематометров для исследования погрешностей зубофрезерных станков // Станки и инструмент. - 1973. - № 4. - С. 23-24.
2. Тарамыкин Ю.П., Алексеева Н.Н. О системах синхронной связи в зубообрабатывающих станках // Вестник машиностроения. - 1973. - № 5. - с. 71-72.
3. Тарамыкин Ю.П., Алексеева Н.Н., Ломовцев Б.И. Стенд для исследования систем синхронной связи: Межотрасл. информ. // Информ. л. НИИМаш. - 1974. - № 53-74. - 2 с. - (Сер. II6-20).
4. А.с. 452453 СССР. Привод коррекционных следящих систем резьбо- и зубообрабатывающих станков/ Ю.П.Тарамыкин, Л.А.Срибнер, М.Б.Школьник и др. // БИ. - 1974. - № 45.
5. А.с. 454971 СССР. Привод системы коррекции кинематических погрешностей/ Ю.П.Тарамыкин, Л.А.Срибнер, М.Б.Школьник и др. // БИ. - 1974. - № 48.
6. Тарамыкин Ю.П. Вопросы формирования поверхностей резанием с применением синхронных систем // Проблемы совершенствования малогабаритных зубофрезерных станков: Материалы науч.-техн. конф. ЛитНИИНТИ. - Вильнюс, 1975. - с. 5-10. - (Лит. респ. правл. НТО МАШпром).
7. Тарамыкин Ю.П. Вопросы автоматизации зубофрезерных станков // Прогрессивные методы обработки зубчатых колес: Тезисы докл. науч. техн. конф. - Минск, 1977. - с. 15-17.
8. Создание зубообрабатывающих станков с ЧПУ. П.М.Рашкович, Ю.П.Тарамыкин, А.С.Цейтлин, В.Ю.Фарон // Научно-технический прогресс в программном управлении машинами: Тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. конф., 4-6 окт. 1977г., г.Одесса. - М., 1977. - с. 114-117.
9. А.С. 666016 СССР. Зубофрезерный станок с ЧПУ/ Ю.П.Тарамыкин, В.А.Ратмиров, П.М.Рашкович, А.С.Цейтлин // БИ. - 1979. - № 21.
10. А.С. 880643 СССР. Способ обработки изделий типа зубчатых колес/ Ю.П.Тарамыкин // БИ. - 1981. - № 42.

11. Тарамыкин Ю.П. Функции микропроцессора в системе диагностирования зубофрезерных станков с ЧПУ// Проблемы создания и эксплуатации систем ЧПУ для металлообрабатывающего оборудования на основе микропроцессоров: Тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. конф., 19-21 мая 1982 г., г.Ульяновск.- М., 1982.-с.120.

12. Тарамыкин Ю.П. Зубообрабатывающие станки с управляемыми электромеханическими структурами// Применение технологического оборудования с ЧПУ для автоматизации производства в машиностроении: Тез.докл.Респ.конф.,-Киев, 1982.-С.47-49.

13. Ребане Ю.К., Тарамыкин Ю.П., Сонкин Б.И. Автоматизированная наладка зубообрабатывающих станков с ЧПУ// Станки и инструмент.- 1983. - № 11. - С.13-14.

14. Ребане Ю.К., Тарамыкин Ю.П., Шлейфман В.Б. Автоматизированный расчет делительных пар зубообрабатывающих станков //Станкостроение Литвы: Сб.статей по науч.-техн. и производ. вопросам.-1984.-Вып.ХУІ.-С.61-69.

15. Тарамыкин Ю.П. Средства автоматизации управления зубообрабатывающими станками//Э.И. Обработка резанием. Отеч.опыт. НИИМАШ.-1984.-Вып.5.-С.4-11.

16. Тарамыкин Ю.П. Зубообрабатывающие ГП-модули// Проблемы создания и эксплуатации гибких автоматизированных систем в машиностроении: Тез.докл.Всесоюз. науч.-техн.конф.,23-25 мая 1984г. г.Вильнюс.-М., 1984.- С.55.

17. Тарамыкин Ю.П. Зубообрабатывающие станочные модули для гибких производственных систем// Проблемные вопросы автоматизации производства:Тез.докл.ІІІ Всесоюз. науч.-техн.конф., Минск, 1984, - С.31-32.

18. А.С. 1136268 СССР. Инструмент для обработки зубчатых колес. Ю.П.Тарамыкин, Ю.К.Ребане, С.В.Бурцев.//БИ.-1985.-№ 5.

19. Портман В.Т., Ребане Ю.К., Тарамыкин Ю.П. Анализ процессов огибания при формообразовании поверхностей на станках //Станки и инструмент.-1985.-№ 5.- С.21-23.

20. Ребане Ю.К., Портман В.Т., Тарамыкин Ю.П. Теория огибания и современные вычислительные методы при технологической подготовке зубообработки и проектировании зуборезных станков //Вестник машиностроения.-1985.- № 8. - С.36-39.

21. Общемашиностроительные нормативы режимов резания, норм износа и расхода зуборезного инструмента при обработке конструк-

ционных углеродистых сталях и чугунов (Временные)/М.:ВНИИТЭМР, 1986.- 224 с.

22. Тарамыкин Ю.П. Анализ точности зубообрабатывающих станков с ЧПУ// Современные проблемы двигателей и энергетических установок летательных аппаратов: Тез.докл. III Всесоюз. конф.-М. 1986.- С.85-87.

23. Тарамыкин Ю.П. ГПС зубчатых изделий в автотракторном машиностроении// Современные проблемы технологии машиностроения: Тез.докл. Всесоюз.науч.-техн.конф. -М, 1986.- С.140.

24. Пакет прикладных программ для расчета зубчатых зацеплений, зубообрабатывающего инструмента и наладок зубообрабатывающих станков./Сост.: Ю.К.Ребане, С.Л.Вишнепольский, А.А.Грачев, Ю.П.Тарамыкин.- М.: ВНИИТЭМР, 1986.-Ч. I -Инструкция по эксплуатации.- II 6 с.

25. Тарамыкин Ю.П. О двух теоремах при программировании зубообработки на зубофрезерных станках с ЧПУ//Обеспечение технологической точности и надежности деталей автомобильной техники: Межвузовский сб.трудов/Под ред.В.В.Нишеты.-М.:ВТУЗ-ЗИЛ, 1986.-С.40-42.

26. Тарамыкин Ю.П. Принципы проектирования зубообрабатывающих модулей// Обеспечение технологической точности и надежности деталей автомобильной техники: Межвузовский сб.трудов/Под ред. В.В.Нишеты.-М.:ВТУЗ-ЗИЛ, 1986.-С.49-50.

27. Тарамыкин Ю.П. Контроль точности зубофрезерных ГП-модулей.//Автоматизация контроля качества в гибком производстве: Материалы науч.-техн.семинара -Севастополь, 1986.-С.26.

28. Тарамыкин Ю.П., Буриев С.В. Анализ точности зубодолбежных станков с ЧПУ// Конструирование, исследование, технология и экономика производства автомобиля: Сб.науч.трудов.-1987.-Вып. I5,- -С.211-221.

29. Расчет и проектирование кинематических схем технологического оборудования: Рекомендации. Сост.: В.З.Мельников, В.А.Снетков, Ю.П.Тарамыкин.-М.: НИИТ Автопром, 1987. Ч. I.- 20 с.

30. Куранов А.Р., Ребане Ю.К., Тарамыкин Ю.П. Имитационная модель обработки партий зубчатых колес на производстве с различными уровнями автоматизации обрабатывающего оборудования//Э.И. Технология, оборудование, организация и экономика машиностроительного производства. Отеч.опыт.ВНИИТЭМР. Сер. I.-1988.-Вып. I.- С.5-8.

31. Тарамыкин Ю.П. Методика построения САПР зубообрабатывающих ГПМ//Вопросы разработки интегрированных комплексов автоматизированного производства и их организационного обеспечения: Тематич. сб. науч. тр. МАИ.-М., 1988. /С. 70-72.

32. Расчет инструмента и карт наладок для обработки зубчатых эвольвентных и червячных колес на станках с ЧПУ: Методические рекомендации/ Сост.: Ю.К.Ребане, С.Л.Вишнепольский, Е.Н.Сарычева, Ю.П.Тарамыкин.-М.:ВНИИТЭМР, 1988.-120 с.

33. А.С. 1437163 СССР. Дисковый шевр/Ю.П.Тарамыкин, А.С.Калашников, А.Б.Петров и др.// БИ.-1988.- № 42.

34. Тарамыкин Ю.П. Концепция роботообеспечения зубообрабатывающих ГПС// Автомобилестроение: проектирование, конструкция, материалы, технологии и производство: Тез. докл. науч.-техн. конф.- М. 1989. - С.53.

35. Тарамыкин Ю.П., Куранов А.Р. Нерегулярность производства как специфическая особенность гибкой автоматизации//Проблемные вопросы развития и повышения эффективности внедрения автоматических производственных комплексов с разной степенью технологической гибкости: Тез. докл. Респ. науч.-техн. конф.-Ташкент, 1989.- С.116-118.

36. Тарамыкин Ю.П., Куранов А.Р. Исследование влияния некоторых факторов на устойчивость среднего времени выполнения заказа на ГПС//Технология и производство деталей автомобильной техники: Межвузовский сб. науч. тр./Под ред. О.В.Таратынова, Е.Г.Щербака.-М.:МАСИ (ВТУЗ-ЗИЛ), 1990.-С.75-81.

37. Тарамыкин Ю.П. Методологические аспекты проектирования зубофрезерных станков нового поколения// Зубчатые передачи: современность и прогресс:Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф.-Одесса, 1990.-С.101.

38. Тарамыкин Ю.П. Механизм формирования толщины среза при зубофрезеровании//Вестник машиностроения.-1990.- №9. -С.46-49.

39. Проектирование и расчет металлорежущего инструмента на ЭВМ/Под ред. О.В.Таратынова, Ю.П.Тарамыкина -М.:Высшая школа, 1990,- 416 с.

ТАРАМЫКИН ЮРИЙ ПАВЛОВИЧ

КОМПЛЕКСНОЕ ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ
ЗУБОФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ НА ОСНОВЕ ЧПУ

(А в т о р е ф е р а т)

Подписано к печати 01.04.91 Формат 60х90 1/16 2,1 ц.л.
Уч.изд.л.1,9 Тираж 100 Заказ 123

Ротапринт МАСИ(ВГУЗ-ЗНИ), 109280, Москва, Автозаводская, 16