

КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

МАХМУДОВ Кабулджон Гафурович

**КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА
И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ
РЕЗАНИЕМ ПО
ПЕРЕХОДНЫМ ПРОЦЕССАМ**

**05.03.01 — Процессы механической
и физико-технической обработки,
станки и инструмент**

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

Киев — 1994



00757018 (S)

Робота виконана в Київському політехнічному інституті на кафедрі технології приоб'єднання.

- Научний консультант - доктор технічних наук,
професор Остаф'єв В. А.
- Офіційні опоненти - доктор технічних наук,
професор Розенберг О. А.,
- доктор технічних наук,
професор Зенкін А. С.,
- доктор технічних наук,
професор Лубимов В. Е.
- Ведуща організація - Український науково-дослідницький
інститут авіаційної технології

Захист состоится 16 мая 1994 года в 15 часов, на заседании специализированного Совета Д 068.14.10 по присуждению ученой степени доктора технических наук при Киевском политехническом институте. Корп. 1, ауд. 214.

Адрес института: 252056, г. Киев-56, проспект Победы, 37. КПИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Киевского политехнического института.

Автореферат был разослан 15 апреля 1994 г.

Отзывы на автореферат диссертации в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью организации, просим направлять в адрес Киевского политехнического института ученому секретарю.

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

Ученый секретарь
специализированного Совета
Д 068.14.10
доктор технических наук

Равская Н. С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время в мире наблюдается тенденция к повышению интеллектуальности производства, обеспечивающей наибольшую его эффективность, на основе автоматизации производственных процессов.

Для создания автоматизированного производства первостепенное значение имеет разработка средств контроля, диагностики и прогнозирования процесса обработки. При обработке металлов резанием наибольшей информативностью в отношении процесса резания должны обладать переходные процессы. Это делает изучение переходных процессов, способов извлечения из них полезной информации и аппаратурного построения реализующих их средств актуальной проблемой.

Цель работы.

1. Теоретико-экспериментальное изучение проблемы контроля, диагностики и прогнозирования процесса резания по переходным процессам, включая:

- общий анализ переходных процессов при резании, их места в процессе резания и информативности по имеющимся данным;
- разработку способа систематизированного изучения переходных процессов при резании,
- исследование переходных процессов с целью выявления и анализа их информативных признаков.

2. Разработка принципиальных основ создания аналого-цифровых приборов и средств контроля, диагностики и прогнозирования процесса обработки металлов резанием в условиях ГПМ и ГПС, использующих информативные параметры переходных процессов

Общая методика исследований. В теоретической части использовался метод моделирования динамики процесса резания. При моделировании был выбран структурный подход. Реализация структурных компонент модели потребовала привлечения ряда методов теории колебаний и теории резания. Расчет динамики модели во времени основывался на численных методах вычислений, включая итерационное решение систем уравнений, конечно-разностное решение интегральных и дифференциальных уравнений. Для автоматизированного проведения расчетов использовалась персональная ЭВМ. По результатам теоретических исследований в соответствии с целью работы формировалось направление экспериментов и уровень интерпретации полученных экспериментально данных, а также подбирался метод их обработки.

Научная новизна. Создана основа для систематизированного теоретико-экспериментального решения многоплановой проблемы контроля, диагностики и прогнозирования процесса резания по переходным процессам. Расширено представление о сущности переходных процессов при резании. Предложен новый способ теоретического изучения переходных процессов с различной легкоменяемой физической и частотной полнотой на основе структурного моделирования процесса резания. Детально проработан вариант динамической модели продольного течения для трехмерного пространства, оперирующий с контактными нагрузками на передней поверхности резца и площадке износа его задней поверхности. Для расчета нагрузок используется оригинальная методика, позволяющая определять длину участка пластического контакта стружки с передней поверхностью резца и средний коэффициент трения. Данная модель учитывает все геометрические параметры резца и позволяет задавать произвольную ориентацию в пространстве осей главных координат подсистемы инструмента.

Экспериментально изучены информативные свойства ряда переходных процессов, имеющих место при резании. Исследованы информативные параметры по отношению к стойкости инструмента, обрабатываемости материала детали, качеству обработанной поверхности, устойчивости процесса резания. Разработаны оригинальные методики контроля, диагностики и прогнозирования состояния процесса резания по информативным параметрам переходных процессов. Научная новизна разработок подтверждена авторскими свидетельствами и патентами.

Практическая ценность. Проведенные исследования способствуют повышению эффективности производства, связанного с обработкой металлов резанием.

Предложенный способ моделирования переходных процессов при резании позволяет осуществлять поиск информативных параметров переходных процессов и на основании этих параметров разрабатывать методики контроля, диагностики и прогнозирования процесса резания. Существенной является возможность изучить на модели поведение информативных параметров при произвольных, что недоступно эксперименту, изменениях параметров системы резания с целью выявления области и условий применения разных методов контроля, диагностики и прогнозирования процесса резания по информативным параметрам переходных процессов.

Представленные в работе методы контроля, диагностики и прогнозирования способствуют повышению эффективности процесса резания на основе адаптивного и автоматического управления резанием.

Самостоятельное значение имеют сформулированные в работе принципы построения приборов и систем контроля, диагностики и прогнозирования процесса резания. Использование этих принципов помогает унифицировать, агрегатизировать и параметризовать создаваемые технические средства.

Реализация работы. Разработанные методики контроля и диагностики процесса резания отражены в приборной и системной реализациях. Все созданные на настоящий момент приборы и системы отличаются более высокими техническими, экономическими и эксплуатационными показателями от существующих на Украине и зарубежных образцов аналогичного назначения. Экономический эффект от внедрения результатов работы по состоянию на 1990 год составил 220 тыс. руб.

Апробация работы. Результаты работы докладывались, обсуждались и были одобрены на международных, всесоюзных, республиканских и вузовских научно-технических конференциях: "Интенсификация технологических процессов механической обработки" (г. Ленинград, 1986 г.); "Теплофизика технологических процессов" (г. Ташкент, 1984 г.); "Технологические пути экономии трудовых и материальных ресурсов и интенсификация производства в приборостроении" (г. Москва, 1983 г.); "Робототехника и автоматизация производственных процессов" (г. Барнаул, 1983 г.); "Высокие технологии в машиностроении" (г. Харьков, 1992 г.); "Новые материалы и технологии машиностроения" (г. Москва, 1992 г.); "Автоматизация технологической подготовки ГПС" (г. Киев, 1991 г.); "Методы повышения производительности и качества обработки деталей на оборудовании автоматизированных производств" (г. Идропов, 1985 г.); "Пути повышения качества и надежности инструмента" (г. Барнаул, 1989 г.); "Вторая научно-техническая конференция молодых ученых, выпускников высшей школы СССР и Польши" (г. Киев, 1986 г.).

Публикации. На тему диссертации опубликовано 36 печатных работ, в том числе 6 авторских свидетельств, 2 патента, 1 монография.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Переходные процессы при резании металлов в существующей литературе еще не получили отражения, соответствующего их значимости. Основной причиной здесь являются сложности физического и математического плана. Среди наиболее затронувших эту сторону переходных процессов можно отметить труды Кудинова В. А., Каллиопина В. В., Лазарева Г. С., Кретицина О. В., Жаркова И. Г., Должикова В. П., Девина Л. Н. и ряд других.

Изучение имеющихся работ по переходным процессам и собственные исследования показали, что в настоящее время отсутствует единое представление о переходных процессах при резании, позволяющее сопоставлять результаты одних исследований с другими, четко представлять себе место, которое занимает один переходной процесс по отношению к другому, предвидеть варианты восприятия какого-либо переходного процесса.

Поэтому чтобы сформировать систематизированный подход к изучению переходных процессов следовало сначала систематизировать восприятие предметной сферы исследований. Для этого нами была разработана логически обоснованная схема классификации переходных процессов, наиболее общая, а значит полная из всех существовавших ранее, рис. 1. Схема содержит набор классификационных признаков, которые надо применять к явлениям, происходящим при резании, знание которых отсюда также обуславливает полноту видения переходных процессов.

Анализ объекта, который представляет собой система резания, в физическом и технологическом смысле позволил сформировать феноменологическую схему процесса резания, рис. 2, которая, несмотря на некоторую неизбежную свою усеченность, посредством раскрытия применительно к ней классификационных признаков рис. 1, определяет практически все известные в настоящее время значимые переходные процессы при резании. Под феноменологической схемой мы подразумеваем такую схему процесса резания, которая позволяет увидеть природу явлений, имеющих место в процессе резания, во всем ее качественном разнообразии, а также проследить какие объекты системы резания вовлечены в формирование этих явлений, определить тот объект, с которым происходят какие-либо конкретные явления.

Некоторые наиболее известные и явные переходные процессы показаны на рис. 3. Они охарактеризованы по трем признакам - типу процесса, при котором наблюдается переходной процесс, типу ха-

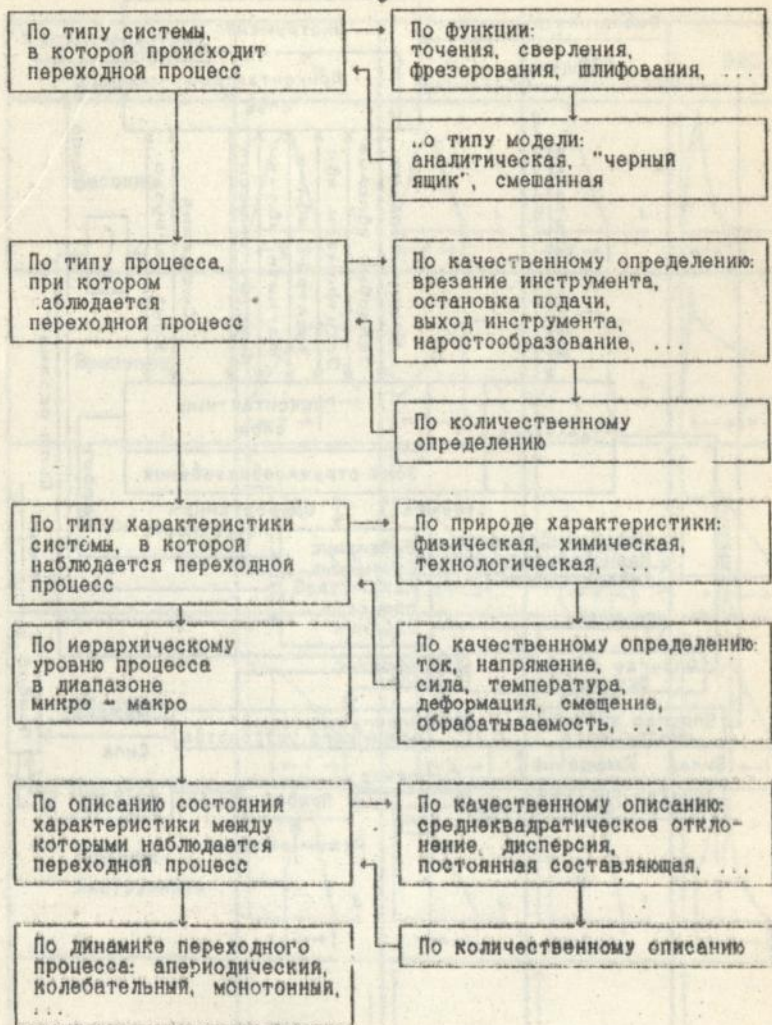


Рис. 1. Классификация переходных процессов при резании

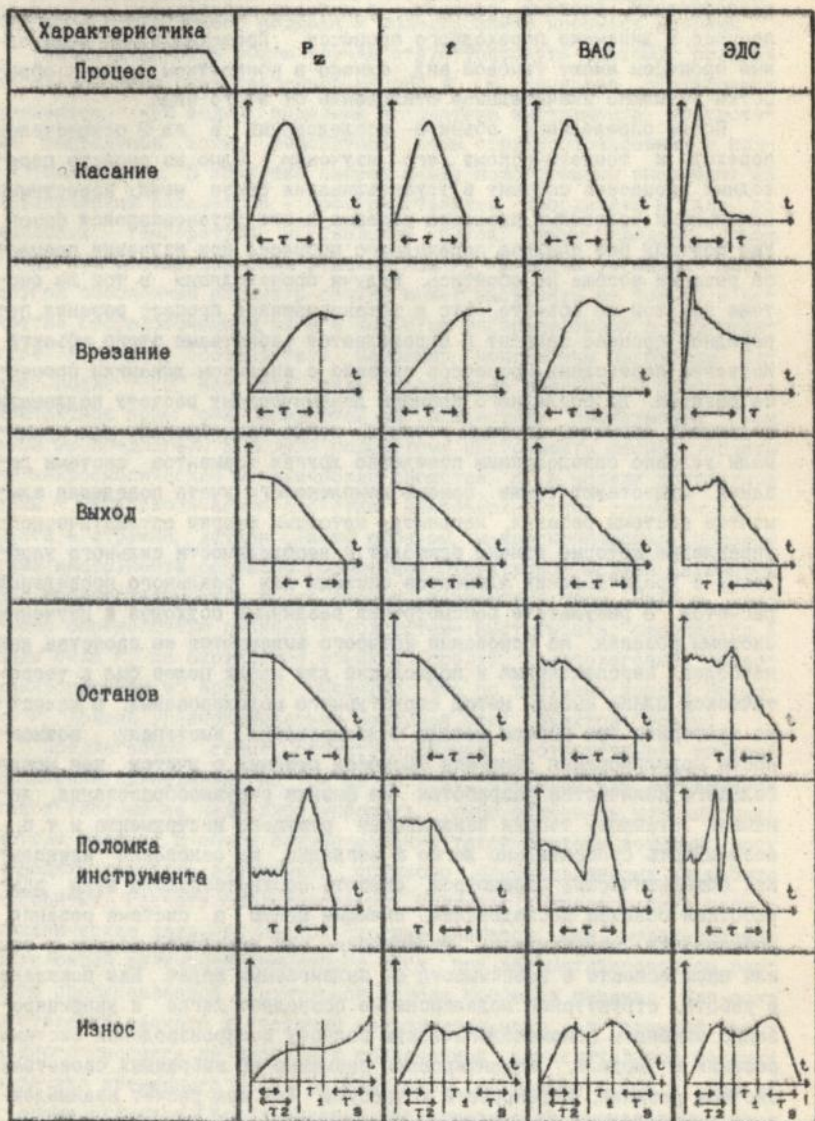


Рис. 3. Типовые переходные процессы при резании

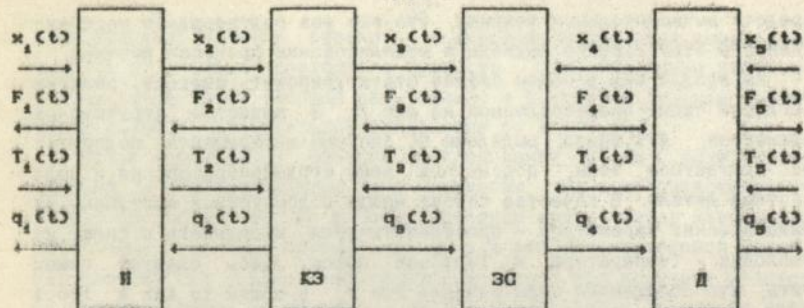
характеристики системы резания, в которой наблюдается переходной процесс, и динамике переходного процесса. Представленные переходные процессы имеют типовой вид, однако в конкретном случае обработки возможно значительное отклонение от этого вида.

После определения объекта исследований в гл. 2 осуществлен переход к теоретическому его изучению. Одно из свойств переходных процессов состоит в установливании связи между известными начальными условиями процесса резания и его установившейся фазой. Уже поэтому без анализа переходного процесса при изучении процесса резания вообще не обойтись. Будучи происходящим в той же системе или том же объекте, что и установившийся процесс резания, переходной процесс зависит и определяется свойствами этого объекта. Изучение переходных процессов связано с анализом динамики процесса резания. До последнего времени динамическому расчету подлежали отдельные элементы системы резания, когда пренебрегали или принимали условно определенным поведение других элементов системы резания. Существуют также приемы комплексного учета поведения элементов системы резания, например, методами теории автоматического управления, которые однако приводят к необходимости сильного упрощения в представлении элементов системы для реального проведения расчетов. В результате рассмотрения различных подходов к изучению системы резания, на основании которого выясняются ее свойства, как наиболее перспективный и подходящий для наших целей был в теоретическом плане выбран метод структурного моделирования. В качестве критериев при выборе метода моделирования выступали: возможность моделирования динамики процесса резания с учетом как можно большего количества разработок по физике стружкообразования, динамике станков, теории изнашивания режущего инструмента и т. п., возможность относительно легко и наглядно, на основании нескольких общезначимых параметров, связать соответствующие этим разработкам объекты исследования, имеющие место в системе резания, возможность оперативного усложнения или упрощения модели в том или ином аспекте в зависимости от выдвигаемых задач. Как показано в работе, структурное моделирование позволяет легко и унифицированно изменять феноменологическую полноту воспроизведения системы резания в модели, акцентировать внимание на выбранных свойствах системы резания, варьировать точность. Так как расчет взаимодействия структурных элементов возможен только на итерационных принципах, требующих достаточно большого объема однотипных вычисления, то возможности метода находятся в соответствии с уровнем развития

средств вычислительной техники, что еще раз подтверждает перспективность структурного подхода к моделированию процесса резания.

Мы предлагаем в общем случае структурировать систему резания согласно схеме представленной на рис. 4. В качестве структурных элементов, как видно, выделены пс система инструмента, подсистема контактной зоны, подсистема зоны стружкообразования и подсистема детали. В качестве связей между подсистемами выступают из механических параметров - пространственная координата и сила, из тепловых - температура и тепловой поток. Здесь следует отметить, что обобщенная сила резания или F_a , в общем то как и любой другой обобщенный параметр связи, может выступать не только в качестве сосредоточенной, но и в качестве распределенной в пространстве величины, соответствуя, например, контактными нагрузкам. Далее, после того, как эта сила окажет свое влияние на процессы в контактной зоне, она передается на подсистему инструмента. При этом мы предлагаем в модели подсистемы инструмента воспроизводить ее макроскопические механические свойства, а в модели контактной зоны - микроскопические свойства приповерхностных слоев инструмента и стружки, детали. Таким образом, макроскопическая подсистема инструмента согласно обобщенной структурной модели находится под воздействием силы F_2 со стороны контактной зоны. Сила F_2 , вызывая определенную реакцию в подсистеме инструмента, передается в виде силы F_1 на окружающие объекты (среду), предполагаемые детерминированными во времени. Очевидно, что по третьему закону Ньютона F_1 должна уравниваться реакцией этих объектов (среды).

Предлагаемая схеме структурирования соответствует система уравнений, приведенная на том же рисунке. Очевидно, что для решения такой системы ее надо либо упрощать, либо применять итерационные методы решения. В общем случае решение такой системы возможно производить пошагово во времени согласно представленному в работе алгоритму. Расчету (моделированию) подлежат низкочастотные термомеханические явления. Низкочастотный диапазон при моделировании обусловлен величиной временного шага при автоматизированном расчете представленной структурной модели процесса резания. Для осуществления расчета достаточно продолжительного во времени переходного процесса на доступной современной вычислительной технике величина временного шага должна быть не меньше 0,001 с, что по теореме отсчетов (Котельникова) ограничивает воспроизводимые частоты во временной области на уровне порядка 500 Гц. В соответствии с алгоритмом расчета производится разделение связанных и



x_i - i -ые пространственные координаты, F_i - i -ая сила,
 T_i - i -ая температура, q_i - i -ый тепловой поток, t - время

$$\begin{aligned}
 F_1 &= f_{ИF} (x_1, F_2, T_1, q_2), \\
 x_2 &= f_{Иx} (x_1, F_2, T_1, q_2), \\
 q_1 &= f_{Иq} (x_1, F_2, T_1, q_2), \\
 T_2 &= f_{ИТ} (x_1, F_2, T_1, q_2), \\
 F_2 &= f_{КЗF} (x_2, F_3, T_2, T_3), \\
 x_3 &= f_{КЗx} (x_2, F_3, T_2, T_3), \\
 q_2 &= f_{КЗq_2} (x_2, F_3, T_2, T_3), \\
 q_3 &= f_{КЗq_3} (x_2, F_3, T_2, T_3), \\
 F_3 &= f_{ЭСF_3} (x_3, x_4, q_3, T_4), \\
 F_4 &= f_{ЭСF_4} (x_3, x_4, q_3, T_4), \\
 T_3 &= f_{ЭСТ} (x_3, x_4, q_3, T_4), \\
 q_4 &= f_{Лq_4} (x_3, x_4, q_3, T_4), \\
 x_4 &= f_{Лx} (F_4, x_5, q_4, T_5), \\
 F_5 &= f_{ДФ} (F_4, x_5, q_4, T_5), \\
 T_4 &= f_{ЛТ} (F_4, x_5, q_4, T_5), \\
 q_5 &= f_{Лq} (F_4, x_5, q_4, T_5).
 \end{aligned}$$

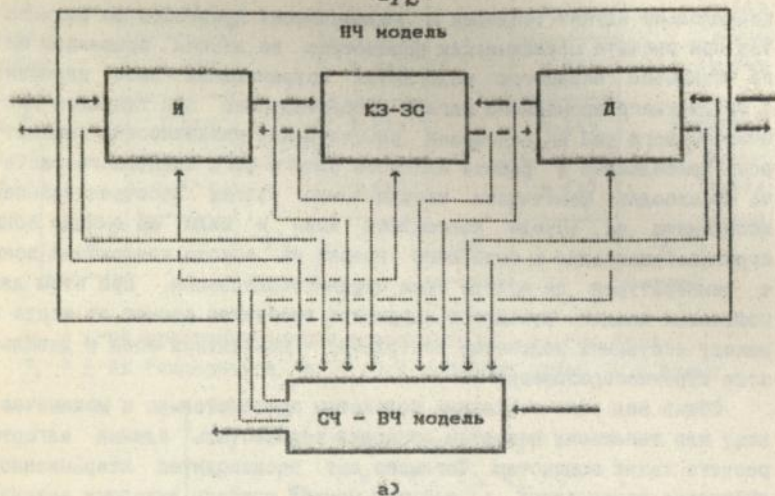
Рис. 4. Обобщенная структурная модель процесса резания

параллельно идущих тепловых и механических процессов во времени. Так при расчете механических параметров на данном временном шаге тепловые параметры полагаются сохраняющими свое значение с предыдущего временного шага и корректируются для текущего временного шага уже на основании рассчитанных механических параметров. Приведенный в работе алгоритм одного шага временного расчета производит фактически итерационную увязку пространственной координаты на выходе контактной зоны и силы на выходе зоны стружкообразования и теплового потока на выходе контактной зоны с температурой на выходе зоны стружкообразования. При этом для получения каждого выходного параметра требуется расчет от входа к выходу составных подсистем инструмент - контактная зона и деталь - зона стружкообразования.

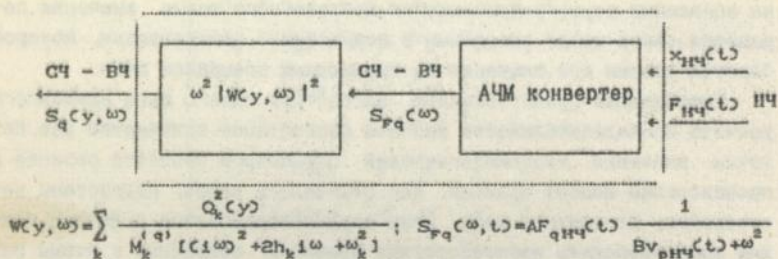
Общий вид этих составных подсистем применительно к механическому или тепловому расчетам позволил разработать единый алгоритм расчета таких подсистем. Согласно ему производится итерационное уточнение неизвестных в текущий момент времени выходных величин на основании первого приближения неизвестного также значения параметра связи между входящими в подсистему подсистемами, которое берется равным его значению на предыдущем временном шаге.

Возобновляя представленную алгоритмом одного шага временного расчета последовательность расчета необходимое количество раз, получим значения термомеханических параметров процесса резания в произвольный момент времени. Как отмечалось ранее, подсистемы инструмента, контактной зоны, зона стружкообразования и детали должны воспроизводить низкочастотные процессы, связанные с этими параметрами. Для учета влияния и воспроизведения среднечастотно-высокочастотных процессов предлагается осуществлять взаимодействие между описанной низкочастотной моделью и дополнительной среднечастотно - высокочастотной моделью по схеме, указанной на рис. 5, а. На таком подходе основан принцип расширения частотного диапазона моделирования. В работе описан вариант дополнительной модели, позволяющий моделировать среднечастотно - высокочастотные колебания инструмента обусловленные пространственной разориентацией плоскостей окользяния в материале заготовки, см. рис. 5, б. Отметим, что расширение частотного диапазона моделирования возможно как при моделировании в частотной области, так и во временной.

Расширению частотного диапазона моделирования практически аналогично по принципу расширение физического диапазона моделирования. При этом необходима дополнительная физическая модель, ис-



а)



б)

Рис. 5. Расширение частотного диапазона моделирования:

а - принципиальная схема;

б - вариант СЧ-ВЧ модели (Срезец - консольная балка, на выходе - спектральная плотность виброускорения резца, источник ВЧ возмущения - пространственная раз- ориентация плоскостей скольжения в материале детали, $Q_k = U_k, V_k, W_k$ - собственные формы колебаний балки, $q = u, v, w$,

$M_k^{(q)}$ - приведенные коэффициенты инерции,

h_q - коэффициенты демпфирования,

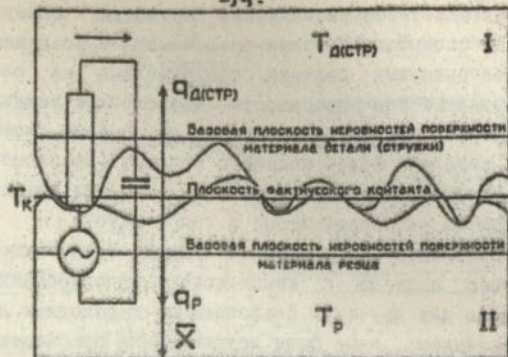
A, B - константы)

пользующая термомеханические параметры, определенные ранее указанным способом. Базовые предпосылки к созданию такой модели термоэлектрических явлений представлены на рис. 6. Конкретизируя приведенные там зависимости для электрических параметров в соответствии с видом интересующей информации, можно получить широкий круг моделей. Более подробно вопросы воспроизведения электрических, электромагнитных процессов, а также акустической эмиссии обсуждаются непосредственно в самой работе.

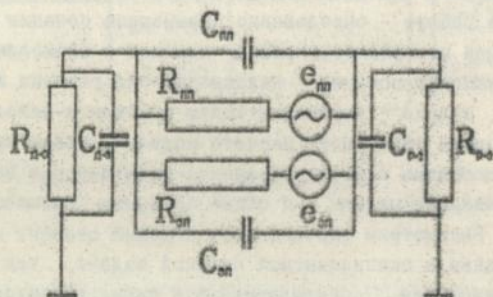
Преследуя цель проверки практической осуществимости разработанного подхода к комплексному моделированию динамики процесса резания для изучения всевозможных переходных процессов, связанных с резанием, нами была осуществлена проработка обобщенной модели применительно к процессу продольного течения. Такой выбор в значительной мере был обусловлен тем, что переходные процессы при продольном течении в определенном смысле имеют канонический вид.

Конкретизированная модель процесса продольного течения представлена на рис. 7. Как видно из рисунка, в данном случае используется единая подмодель составной в общем случае подсистемы контактная зона - зона стружкообразования. После проработки этой важнейшей для всей модели подмодели были выделены следующие этапы в ее работе - определение параметров сечения срезаемого слоя передней поверхностью резца, переход к эквивалентной плоской задаче стружкообразования, нахождение сил резания в эквивалентной плоской задаче, переход к силам резания в исходной объемной задаче. Алгоритмы временного расчета модели в целом представлен в работе. В алгоритме находят отражение практические моменты, возникшие при реализации модели, и общие принципы, изложенные выше.

Рассмотрим сначала предлагаемый вариант метода нахождения сил резания в эквивалентной плоской задаче, так как процесс стружкообразования, определяющий эти силы, является сложнейшим и ключевым. Исходя из преследуемой при моделировании вышеназванной цели, и, стараясь по-возможности следовать физическим представлениям о процессе стружкообразования, а не его эмпирико-математическим описаниям, мы остановились, как на первом варианте, на механизме сливного стружкообразования с единственной условной плоскостью сдвига. Несмотря на наибольшую относительную простоту именно такой процесс, как известно, имеет место в определенном довольно широком диапазоне режимов резания и обрабатываемых материалов. При этом, по-видимому, можно в большом количестве случаев без существенного ущерба для точности рассматривать, как базовую, плос-



а)



б)

Рис. 6. Расширение физического диапазона моделирования:
 а - схема контактирования поверхностей;
 б - вариант приведенной электрической схемы
 (ПП-передняя поверхность резца, ЗП-задняя
 поверхность резца, Р-резец, Д-деталь, З-земля)

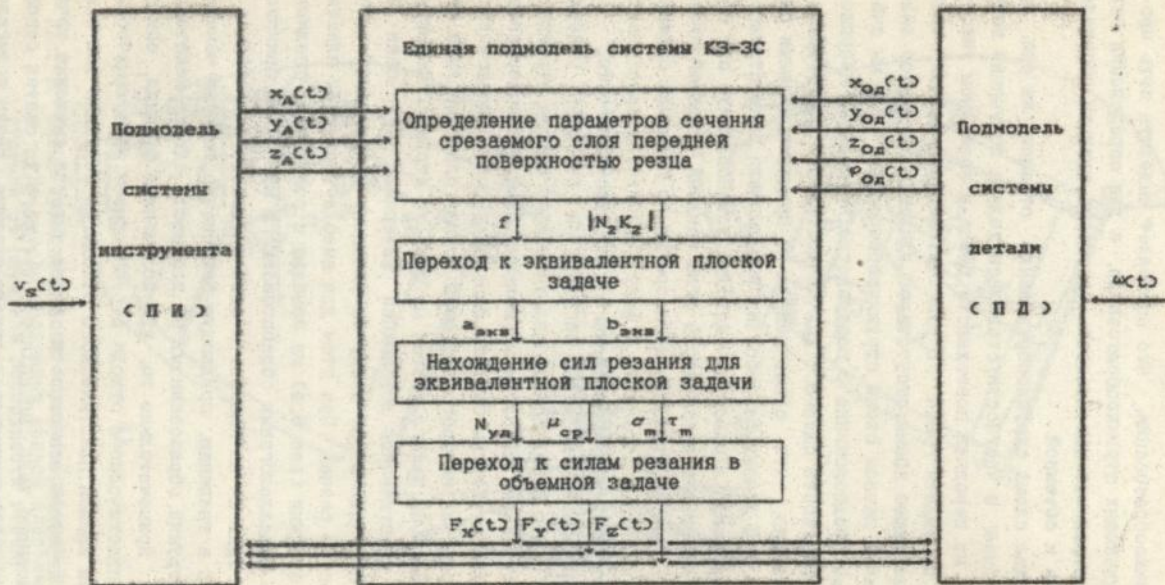


Рис. 7. Модель продольного точения

кую задачу стружкообразования, что позволяет выделить суть процессов, обуславливающих стружкообразование, а для определения сил в 3-х мерном пространстве использовать некоторый принцип перехода от плоской задачи к объемной.

Соответствующая схема стружкообразования отражена на рис. 8, а, б. При ее анализе, в частности, ставилась задача получения контактных нагрузок на передней поверхности резца и возможном участке износа резца по задней грани. В существующей по данной теме литературе в настоящее время отсутствует удовлетворительное аналитическое описание данной схемы стружкообразования. Так мы считали недопустимым предположение о постоянстве нормальных напряжений на условной плоскости сдвига, как не достаточно подтверждаемое экспериментально, что сразу делало не применимым целый ряд известных формул. В основу разработанной подмодели зоны стружкообразования мы заложили 3 момента - исходно установленную при обработке данного материала зависимость угла наклона условной плоскости сдвига от среднего коэффициента трения по передней поверхности и переднего угла инструмента, факт постоянства касательных напряжений на условной плоскости сдвига и их максимальности.

Для получения эпюры контактных нагрузок на передней поверхности резца мы нашли форму кривой пластического отхода стружки и приняли, что контактные нагрузки нормальные передней поверхности инструмента вызваны упругим сжатием плоской передней поверхности резца с телом границей которого является кривая пластического отхода стружки. Если бы такого сжатия не было, то стружка, формируясь посредством пластической деформации материала заготовки на плоскости сдвига, завиваясь, сразу бы выходила из контакта с передней поверхностью резца. При этом для вывода уравнения пластического отхода стружки (рис. 8, а) мы приняли, в отличие от традиционной схемы, что параллелограмм обрабатываемого материала, прилежащий к плоскости сдвига на плоскости сдвига трансформируется не в параллелограмм, а в трапецию, придающую бесконечно тонкому начальному элементу стружки, образованному на плоскости сдвига, некоторую клинообразность. Примечательно то, что полученная функция, описывающая кривую пластического отхода стружки имеет логарифмический вид. На основании кривой пластического отхода мы получали уже эпюру нормальных передней поверхности резца упругих смещений точек поверхности условного тела, поверхность которого до сжатия совпадает с этой кривой пластического отхода стружки. Резец полагался здесь абсолютно жестким. Полученная эпюра смещений приводилась к

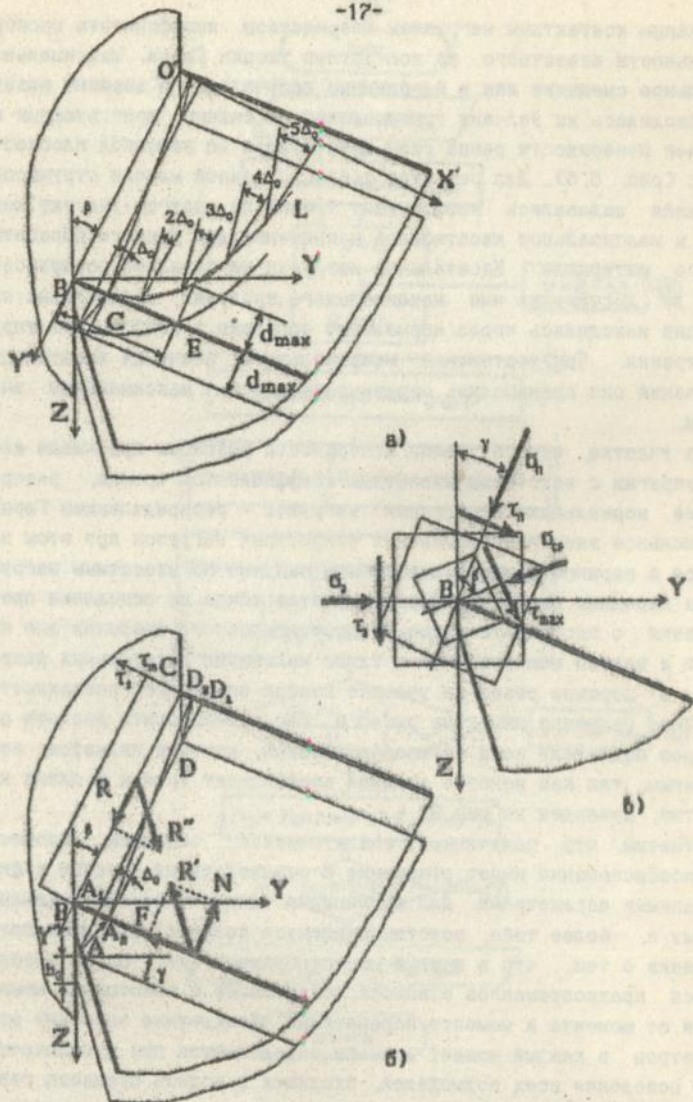


Рис. 8. Схемы подмодели зоны стружкообразования:
 а - для вывода уравнения кривой пластического отхода стружки от передней поверхности резца; б - для расчета контактных нагрузок на передней поверхности резца;
 в - для расчета контактных нагрузок на площадке износа резца по задней грани

нормальным контактными нагрузкам посредством коэффициента пропорциональности известного из контактной теории Герца. Максимальное нормальное смещение как и напряжение получалось в вершине реза, оно находилось из условия уравнивания силами, действующими на передней поверхности реза силы, действующей на условной плоскости сдвига (рис. 8, б). Для расчетов согласно данной модели стружкообразования задавались коэффициент трения на упругом участке контакта и максимальное касательное напряжение для данного обрабатываемого материала. Касательные нагрузки на передней поверхности реза до достижения ими максимального значения касательных напряжений находились через нормальные нагрузки и коэффициент упругого трения. При достижении максимального значения касательных напряжений они принимались ограниченными этим максимальным значением.

На участке износа задней поверхности реза мы принимали контакт упругим с некоторым известным коэффициентом трения, распределение нормальных контактных нагрузок — распределением Герца. Максимальное значение нормальных контактных нагрузок при этом находится в вершине реза и может быть найдено по известным нагрузкам на передней поверхности реза в этой точке на основании предположения о постоянстве здесь гидростатического давления для передней и задней поверхности, а также максимума касательных напряжений в вершине реза на участке износа его задней поверхности. Сказанное показано на схеме рис. 8, в. Рабочий алгоритм расчета параметров подмодели зоны стружкообразования, который является итерационным, так как исходно средний коэффициент трения и длина неизвестны, приведен на рис. 9.

Отметим, что полученное аналитическое описание процесса стружкообразования имеет отношение к стационарному резанию с фиксированными параметрами. Для применения такого описания к динамическому и, более того, неустойчившемуся резанию мы делаем предположение о том, что в каждый момент времени при таком резании имеется кратковременное стационарное резание с некоторыми меняющимися от момента к моменту параметрами. Конкретные значения этих параметров в каждый момент времени определяются при динамическом учете поведения всех подмоделей, входящих в модель процесса резания, который, как уже отмечалось, осуществляется по разработанному алгоритму итерационной увязки.

Проверка адекватности описанной подмодели зоны стружкообразования реальной картине стационарного стружкообразования была про-

ведена путем сопоставления расчетных и экспериментальных эпюр контактных нагрузок на передней поверхности резца и участке износа задней поверхности резца. Экспериментальные данные были получены методом разрезного резца. Согласно имеющимся в работе графикам, наблюдается определенное соответствие между экспериментальными и расчетными нагрузками, особенно в интегральном плане, что имеет первостепенное значение, так как обуславливает близость смоделированных и реальных сил резания.

Свойства полученной подмодели стружкообразования иллюстрирует рис. 10. Из этого рисунка видно как изменяются важнейшие параметры собственно процесса стружкообразования при изменении исходных параметров подмодели - угла трения на участке упругого контакта и переднего угла инструмента. Сопоставление приведенных зависимостей с существующими о них общими физическими представлениями убеждает в физической достоверности подмодели. Отметим, что упомянутые исходные параметры подмодели стружкообразования имеют фиксированное значение при стационарном резании и могут изменяться в переходном или неустановившемся режиме. То, что разработанная подмодель позволяет связать произвольные значения этих параметров с выходными параметрами, подтверждает ее применимость для динамического расчета.

Еще одним исходным параметром подмодели стружкообразования является глубина резания. Именно этот параметр принят подверженным существенным изменениям в переходных процессах, которые мы выбрали для моделирования в первую очередь. Для расчетов динамики переходных процессов по разработанному итерационному алгоритму нами предварительно производился расчет матриц связи этого исходного параметра с выходными параметрами процесса стружкообразования. Такая матрица позволяет в ходе динамического расчета, минуя расчеты подмодели стружкообразования, занимающие достаточно много времени, получать значения выходных параметров подмодели стружкообразования в зависимости от значений исходных. Так как матрица не обеспечивает непрерывной связи, то в промежутках между отсчетами использовалась интерполяция. В наших расчетах использовались двумерные матрицы, потому, что учитывался еще и коэффициент трения на участке упругого контакта, как параметр, который может изменяться во времени.

Для прѣхода от объемной задачи к плоской и наоборот был разработан принцип прѣхода. Его иллюстрирует рис. 11. Принцип основан на экспериментально установленном факте равенства ширины

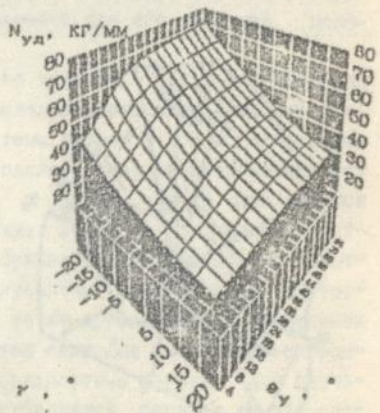
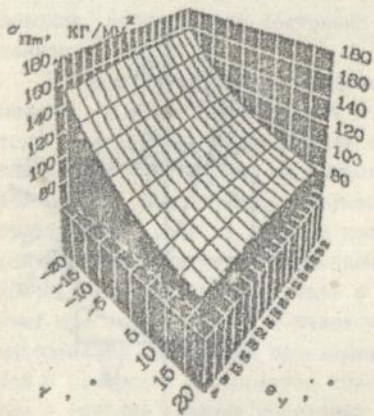
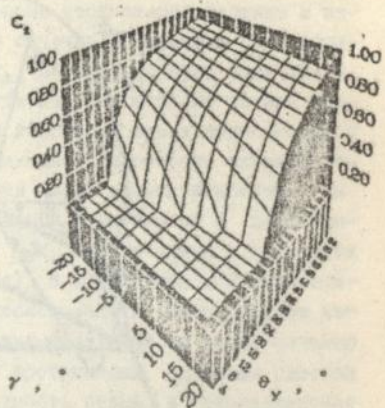
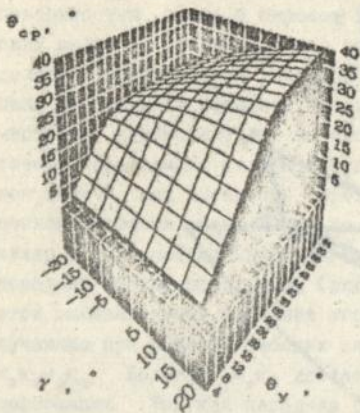
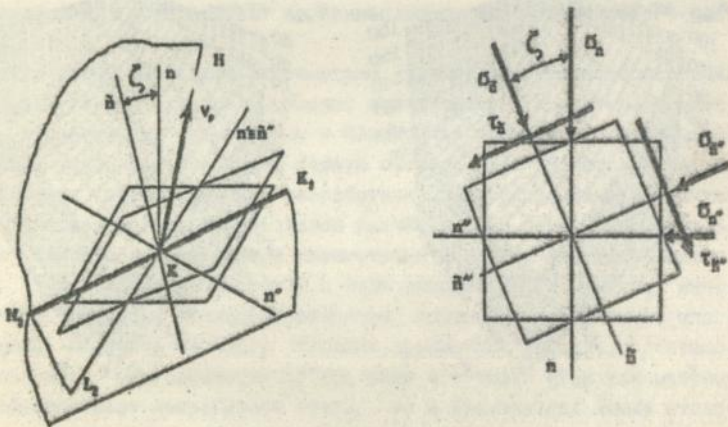
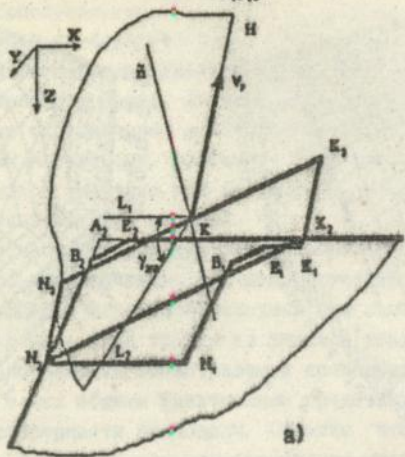


Рис. 10. Пример расчета выходных параметров подмодели 3С
 (сталь с $\tau_m = 48 \text{ кг/мм}^2$, $a = 0,26 \text{ мм}$
 $\theta_y = \arctan(\mu_y)$, $\theta_{cp} = \arctan(\mu_{cp})$, $C_1 = C_{II} C$)



б) .

Рис. 11. Схемы к принципу перехода между плоской и объемной задачами: а - для определения плоскости эквивалентной плоской задачи; б - для перехода от эквивалентной плоской задачи к исходной объемной

стружки максимальной диагонали сечения срезаемого слоя передней поверхностью резца в широком диапазоне соотношения толщины и ширины среза. В соответствии с этим в сечении срезаемого слоя определяется максимальная диагональ n_2k_2 , перпендикулярно этой диагонали в плоскости передней поверхности резца в сторону детали формируется эквивалентное по площади реальному срезу прямоугольное сечение срезаемого слоя $n_2k_2n_3k_3$, находится плоскость эквивалентной задачи, как плоскость, проходящая через вектор мгновенной линейной скорости инструмента по отношению к детали v_r и перпендикуляр kl_2 к максимальной диагонали n_2k_2 , построенный в плоскости передней поверхности резца (рис. 11, а). В этой плоскости определяется эквивалентный передний угол плоской задачи. Силы резания, полученные при решении плоских задач интегрируются по всему сечению $n_2k_2n_3k_3$. Полагая n_2k_2 достаточно протяженным, считаем плоской деформацию. Так как передняя поверхность резца в эквивалентной плоской задаче перпендикулярна к плоскости эквивалентной плоской задачи и наклонена в общем случае к реальной передней поверхности резца под некоторым углом ζ , то переход к силам, действующим на реальный резец делается на основании известных формул преобразования напряженного состояния элемента при его повороте, показанном на рис. 11, б.

В обсуждаемой модели продольного течения, как и в обобщенной модели, в качестве отдельных подмоделей выступают подмодель системы инструмента и подмодель системы детали. При моделировании подсистемы инструмента мы воспользовались традиционной механической схемой. Подсистема инструмента в данном случае определяется ориентацией осей ее главных координат $x'y'z'$ в трехмерном пространстве координат xuz , значениями приведенных коэффициентов жесткости, демпфирования и масс в направлении главных осей. Инструмент при этом сводится к некоторой точке a , совпадающей с вершиной инструмента, в которой прикладываются силы. Для нахождения скоростей и ускорений применяется конечноразностные формулы. Для расчетов в системе главных координат производится переход в эту систему из системы xuz с последующим возвратом.

В работе представлен вариант подмодели детали. Моделировалась консолюльно закрепленная деталь. Предполагалось, что компонентами F_{ψ} , F_{Σ} силы резания возможен чистый поперечный изгиб детали, а компонента F_{Σ} производит продольное смещение детали в соответствии с приведенным коэффициентом жесткости c_{Σ} .

Динамический расчет разработанной модели продольного течения

возможен только с помощью средств вычислительной техники. При этом необходимо создать доступный вычислительной машине прообраз пространства - времени, в котором проявляется моделируемая система. Ориентация на возможности доступных компьютеров обусловила выбор схемы дискретизации и локализации пространства при расчете динамики продольного точения. В соответствии со схемой, компьютер постоянно хранит информацию о 781-м поперечном сечении детали в виде файла из 781 блока, каждый из которых содержит 1440 отсчетов расстояния от центра сечения детали до ее поверхности, произведенных через угловой интервал в 0,25 градуса.

При расчете динамики продольного точения в дискретизированной постановке по ранее отмеченному алгоритму возникает проблема с расчетом геометрических параметров сечения срезаемого слоя передней поверхностью резца для резца с произвольной геометрией. Специально для этого был разработан алгоритм определения необходимых геометрических параметров путем сканирования отсчетов расстояний от центра поперечного сечения детали до ее поверхности в угловом секторе, обеспечивающем охват резца, при последовательном переходе от одного поперечного сечения детали к другому в диапазоне, гарантирующем охват сечения срезаемого слоя.

Большое количество динамических явлений при резании связано с резанием инструмента по следу, оставленному им на предыдущем обороте детали. В связи с этим нами был специально изучен вопрос практической осуществимости учета следа инструмента при выбранном подходе к моделированию процесса резания. В результате был разработан способ решения этой задачи моделирования, который отражен в схеме и алгоритме, приведенных непосредственно в работе.

Окончательная детализация всего вышеизложенного в отношении предлагаемого подхода к моделированию динамики процесса резания позволила осуществить моделирование ряда переходных процессов при резании и, в первую очередь, переходного процесса при врезании инструмента в деталь. Некоторые результаты представлены на рис. 12. Они доказывают реалистичность предлагаемого подхода к моделированию и иллюстрируют исключительную возможность, которую такое моделирование предоставляет - отслеживать влияние изменений различных исходных параметров системы резания на динамику переходного процесса как по отдельности, так и во всевозможных сочетаниях.

Проведенные разработки структурного моделирования процесса резания по своей сути представляются нам перспективным методом теоретического изучения разнообразных переходных процессов при

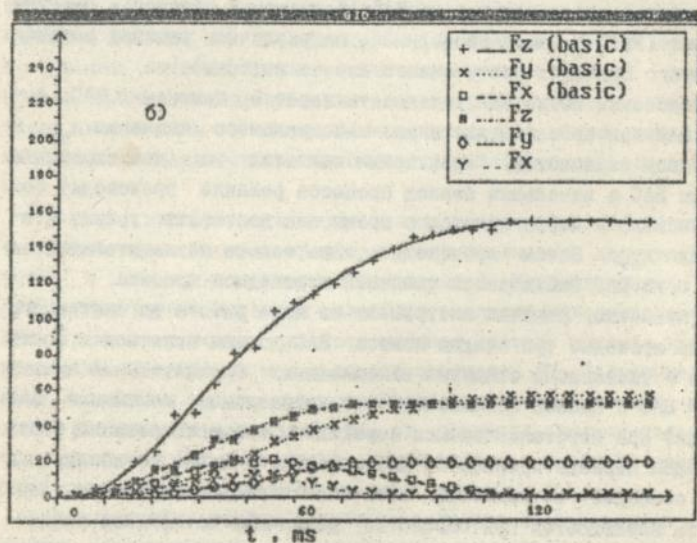
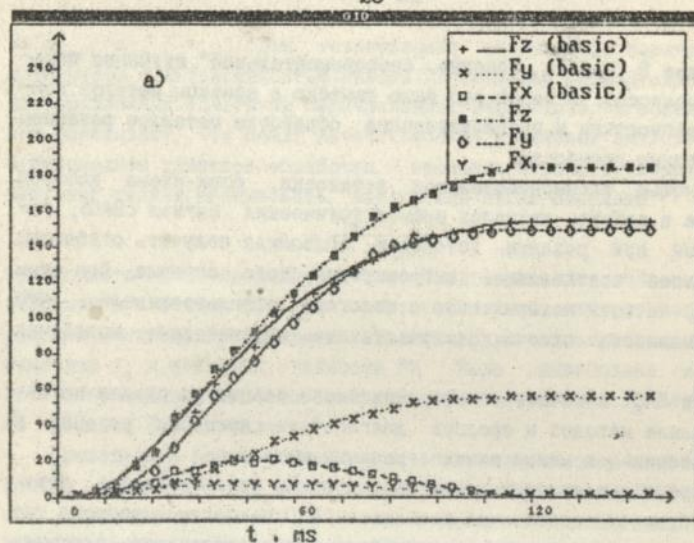


Рис. 12. Примеры результатов моделирования процесса резания: а - силы при резании изношенным резцом с $h_{\text{в}} = 0,6$ мм в сопоставлении с силами при резании острым резцом (базовый вариант); б - силы при резании острым резцом и уменьшенной в 100 раз приведенной жесткостью подсистемы инструмента по всем осям в сопоставлении с базовым вариантом

резании.

В главе 3 работы описано экспериментальное изучение переходных процессов. В целом оно было увязано с поиском методов контроля, диагностики и прогнозирования обработки металлов резанием по переходным процессам.

С помощью экспериментальной установки, блок-схема которой приведена в работе, изучался виброакустический сигнал с ВАС, генерируемый при резании. Установка позволяла получить огибающую интегральной составляющей виброакустического сигнала. При этом сигналы, частоты которых ниже 5 килогерц отфильтровывались, что дало возможность отсеять низкочастотные механические колебания ТОС.

Выбор ВАС в качестве информационного параметра сделан на основе анализа методов и средств диагностики процесса резания и теоретических положений науки о резании металлов.

Во время экспериментальных исследований использовались режущие инструменты, оснащенные датчиками ВАС пьезокерамического типа. Методика проведения экспериментальных исследований состояла в том, что при различных парах "обрабатываемый образец - режущий инструмент СРЮ" резание проводилось на различных режимах резания до принятого значения критического износа инструментов.

Исследования позволили установить характер изменения ВАС. Амплитуда ВАС при врезании достигает максимального значения A_{max} и в дальнейшем изменяется. Характерным является то, что изменение амплитуды ВАС в начальный период процесса резания происходит более интенсивно и через некоторое время она достигает уровня стабилизации $A_{ст}$. Затем происходит лишь только незначительный ее рост, т. е. в ВАС наблюдается типичный переходной процесс.

Как известно, режущий инструмент по мере работы до снятия его со станка проходит три стадии износа. ВАС должен меняться в соответствии с указанными стадиями изнашивания. Сравнительный анализ динамики ВАС и износа показывает, что интенсивное изменение ВАС происходит при неустановившемся переходном процессе резания, соответствующем периоду приработки инструмента, и время стабилизации ВАС $t_{ст}$ совпадает со временем окончания периода приработки. Данная связь наблюдается при обработке различных материалов различными режущими инструментами на различных режимах резания. Кроме того, незначительное изменение амплитуды ВАС происходит в стадии установившегося износа инструмента, а новое резкое увеличение амплитуды ВАС соответствует следующему неустановившемуся переходному

му процессу резания в стадии катастрофического износа.

Параметрами, характеризующими переходной процесс ВАС являются A_{\max} , $A_{ст}$, $\tau_{ст}$. Для установления взаимосвязи перечисленных параметров с интенсивностью износа РИ проведен сравнительный анализ различных сочетаний перечисленных параметров. В совокупности они показывают, что между интенсивностью изменения амплитуды ВАС в переходном процессе обработки - врезании, и износостойкостью существует тесная взаимосвязь, выражаемая через параметр

$$J_{\Delta} = \frac{A_{\max} - A_{ст}}{\tau_{ст}}$$

переходного процесса ВАС. Эта связь подтверждается при различных условиях обработки. Обобщение результатов и их математическая обработка позволили установить аналитическую зависимость между параметром J_{Δ} и периодом стойкости РИ. Была разработана методика прогнозирования стойкости инструментов по параметру J_{Δ} переходного процесса ВАС сигнала.

Проведенные ранее теоретические исследования переходных процессов показали, что одной из разновидностей переходных процессов, возможных в системе резания, являются процессы, происходящие при изменении режимов резания. Их можно назвать свертками следующих один за другим во времени переходных процессов, вызванных изменением режимов или же переходными процессами, происходящими не во времени, а в измерении изменяемого режима резания, например, подачи. Для изучения изменения параметров процесса резания при таком переходном процессе изменения подачи была использована экспериментальная установка, блок-схема которой приведена в работе.

В ходе эксперимента осуществлялась одновременная регистрация комплекса параметров, характеризующих физические явления при резании и его технологических показателей. Корреляционный анализ полученных данных позволил разработать способ ускоренного определения режимов резания, при которых достигается минимальная шероховатость поверхности, максимальная стойкость РИ. Полученная связь силы, амплитуды ВАС α , шероховатости поверхности детали и стойкости инструмента в зависимости от значения подачи показывает, что параметр α ВАС достаточно чувствителен, чтобы по нему можно было судить об остальных параметрах.

Рациональные условия обработки металлов обеспечиваются в основном установлением надлежащих режимов резания. В свою очередь режимы резания назначаются исходя из обрабатываемости металла. Мы попытались облегчить оценку обрабатываемости на основе использо-

вания повышенной информативности переходных процессов по отношению к установившимся. Были рассмотрены наиболее распространенные виды механической обработки - точение и сверление.

В первом случае в качестве критерия обрабатываемости использовалась эффективная мощность главного двигателя станка, затраченная на осуществление упругой и пластической деформации, разрушение пограничного слоя испытуемого образца за время от момента контакта инструмента с образцом до начала резания при полном объеме срезаемого слоя. Во втором случае в качестве критерия обрабатываемости использовалось время от момента контакта сверла с образцом до полного его врезания в испытываемый образец. Полученные в ходе экспериментов результаты показывают прямую связь отмеченных характеристик переходных процессов с параметром обрабатываемости металлов, которая легла в основу разработанных способов оценки обрабатываемости металлов по параметрам переходных процессов, сопутствующих переходному процессу резания - врезанию.

Проведенные исследования показали информационную пригодность переходных процессов при изменении подачи для установления допустимого диапазона подач в зависимости от характера обработки. Для этого из общего уровня ВАС выделялась модуляционная составляющая и определялась ее спектральная плотность. Как показывают эксперименты, при малых по-1ках модуляционная составляющая носит в основном случайный характер, а спектральная плотность достаточно широкая. Это объясняется тем, что в данном диапазоне подач резание граничит с трением и идет в переходном режиме. При этом энергетические затарты высоки из-за реологических процессов сзона Аз. Аналогичные явления наблюдаются при неблагоприятных условиях резания в области высоких значений режимов резания сзона Бз, где нелинейные эффекты возникают из-за увеличения интенсивности термомеханических или нелинейности реологических процессов, а также при наростообразовании сзона Бз.

На основании анализа полученных результатов был предложен метод определения двух границ диапазона допустимых значения подач. Первая граница обусловлена требованиями к качеству обработанной поверхности и точности сзона Бз, а вторая - требованием к производительности сзона Г и Дз.

Аналогичное определение границ осуществимо на основании силового параметра. В данном случае для определения границ можно воспользоваться аналитической зависимостью силы резания от размеров срезаемого слоя типа

$$P_z = C_p \cdot b \cdot a^n$$

где C_p - постоянный коэффициент, зависящий от условия обработки, b - ширина срезаемого слоя, a - толщина срезаемого слоя, n - показатель степени влияния толщины срезаемого слоя на $F_{из}$, которая имеет место при устойчивом качественном резании. В роли критерия для определения границ такого резания выступает отклонение расчетных значений коэффициента C_p от экспериментальных. Силовой метод легко автоматизируется с использованием приведенного в работе алгоритма.

Аппаратурная реализация разработанных и разрабатываемых методов контроля и диагностики процесса резания на основании информации, содержащейся в переходных процессах системы резания, может быть сделана относительно легкой и эффективной при использовании определенных принципов.

На основании опыта, приобретенного при создании соответствующих приборов и систем, нами здесь было отмечено два важнейших момента - адекватность ставящихся перед аппаратурой задач выбору информативных параметров и определенная, исходя из ряда эксплуатационных требований, иерархическая увязка выбранных информативных параметров.

В соответствии с результатами работы можно по физическому типу характеристики, которая используется при наблюдении переходного процесса, выделить три его основные характеристики - силу, акустическую эмиссию, электромагнитную эмиссию. Все перечисленные характеристики берутся в широком смысле, т. е. акустическая эмиссия, например, включает в себя как генерацию звуковых волн микродефектами структуры материала, так и генерацию звуковых волн при макровибрациях инструмента или детали. Информативность параметров этих характеристик, обозначаемая как P_F , $P_{АЭ}$, $P_{ЭМЭ}$ приведена в работе в зависимости от ситуации металлообработки. Эта зависимость использовалась, в частности, для выработки порядка формирования команд диагностики и эффективных режимов при их формировании.

Согласно принципу иерархической подчиненности, первое приоритетное значение имеет функция самоконтроля технической системы, второй приоритет принадлежит функции контроля касания. Самоконтроль и контроль касания, поэтому, проводятся по отдельным каналам. Осуществляется суммирование данных о касании по трем группам информативных параметров. По результатам суммирования формируется команда разрешения работы и сигнал касания. Должен соблюдаться порядок появления сигналов касания по информационным каналам - сначала по $P_{ЭМЭ}$, затем по $P_{АЭ}$ и в последнюю очередь по P_F . Любое

нарушение этого порядка говорит о неисправности технической системы или аварии станочного оборудования.

Третьим и четвертым приоритетом должны соответственно обладать функции текущего контроля, диагностики, прогнозирования и поломки инструмента.

Для осуществления текущего контроля, диагностики, прогнозирования следует использовать иерархичность наборов информационных параметров, отвечающую логической функции вида $A = B(C \vee D)$. Подстановка параметров из выбранного набора в эту функцию осуществляется по принципу приоритетности параметров в данной технологической системе. Наивысший приоритет должен иметь параметр, поставленный перед скобкой. Без него нельзя будет осуществить функцию контроля и диагностики.

На основе разработанных принципов была приборно реализована диагностика процесса резания по переходным процессам с использованием $\Pi_{ЭМЗ}$ и $\Pi_{АЭ}$. Улучшены показатели работы системы контроля с помощью повышения полноты использования информативного параметра переходного процесса. Создана система практически полной диагностики и контроля состояния режущего инструмента по информативному параметру $\Pi_{АЭ}$. Делается вывод, что по мере расширения круга задач, ставящихся перед системой диагностики и контроля, неизбежно увеличивается полнота использования информативного параметра, и это проявляется в техническом усложнении системы.

Практика создания приборов контроля и диагностики с учетом вышесказанных принципов подтверждает, что эти приборы имеют серьезные преимущества перед рядом подобных приборов: надежность, простоту конструкции, низкую себестоимость и высокую точность. Среди таких приборов выделяются группа приборов, осуществляющая контроль геометрии РИ по одной, двум и трем координатам, прибор контроля разрушения инструмента и двухпараметрическая система контроля состояния РИ по $\Pi_{АЭ}$ и $\Pi_{ЭМЗ}$, приборы контроля геометрии детали и РИ, разработанные специально для станков типа ОЦ.

Отмеченные приборы и системы контроля и диагностики металлообработки по переходным процессам связывают в широком диапазоне такие характеристики переходных процессов, как технологическая принадлежность и физическая природа анализируемого сигнала с такими характеристиками приборов и систем, как решаемые ими функциональные задачи и формулы решения.

Экономическая целесообразность использования разработанных технических средств подтверждается опытом внедрения их в производство.

В настоящей диссертации в результате работы над многоплановой проблемой контроля, диагностики и прогнозирования процесса резания по переходным процессам создана основа для ее систематизированного теоретико - экспериментального решения.

На основании общего анализа и систематизированного изучения переходных процессов определена их информативность, теоретико - экспериментально подтверждена пригодность, эффективность и перспективность использования переходных процессов для контроля, диагностики и прогнозирования процесса резания.

Разработаны схемы для классификации переходных процессов и определения их места в процессе резания, расширяющие представление о сущности переходных процессов при резании и позволяющие соотнести результаты исследования этого явления, проведенные разными авторами.

Для теоретического изучения переходных процессов при резании с целью анализа их информативных параметров по отношению к контролю, диагностике и прогнозированию процесса резания выбран метод физического моделирования динамики процесса резания, дающий исключительную возможность проследить селективно и в широком диапазоне влияние изменения параметров системы резания на информативные параметры переходных процессов.

Предложен способ структуризации процесса резания, позволяющий практически производить моделирование динамики процесса резания с различной частотной и физической полнотой.

Предложены конкретные варианты реализации подмоделей структурной модели процесса резания, которые могут быть непосредственно использованы для низкочастотного, среднечастотно-высокочастотного и расширенного физического моделирования.

Согласно разработанному способу моделирования обобщенного процесса резания детализирована модель продольного точения. При этом создана схема локализации и дискретизации пространства для автоматизированного расчета динамики, а также способ определения необходимых для моделирования геометрических параметров срезаемого слоя в дискретизированном пространстве.

Предложен метод перехода от объемной задачи механики стружкообразования к плоской и наоборот.

Разработан метод расчета параметров подмодели стружкообразования, учитывающий завивание стружки, который позволяет находить средний коэффициент трения и длину участка пластического контакта

стружки с передней поверхностью резца, контактные нагрузки на передней поверхности резца и площадке износа его задней поверхности.

Разработан способ моделирования следа инструмента на поверхности обрабатываемой детали, применимый в дискретизированном пространстве.

Проведенные расчеты переходных процессов при врезании инструмента в заготовку доказывают применимость результатов моделирования для определения чувствительности параметров переходных процессов к различным параметрам системы резания, для выработки наиболее эффективных способов информационного использования параметров переходных процессов в целях контроля, диагностики и прогнозирования процесса резания, для выявления области и условий применения методов контроля, диагностики и прогнозирования процесса резания по информативным параметрам переходных процессов.

Экспериментально подтверждено, что переходные процессы резания, особенно в начальный период износа режущего инструмента, генерируют виброакустический сигнал, изменяющийся по амплитуде во времени, связанный с процессами приспособления инструмента к заданным условиям механообработки, когда происходит интенсивное изменение его геометрической формы и внутренней структуры.

Экспериментально установлено, что переходные процессы резания в начальный период обработки характеризуются максимальным значением амплитуды, значением амплитуды стабильного уровня и временем стабилизации амплитуды виброакустического сигнала, на основе которых выявлен информативный параметр переходных процессов виброакустического сигнала – интенсивность изменения амплитуды виброакустического сигнала J_A , для оценки износостойкости режущих инструментов.

Разработана методика прогнозирования периода стойкости режущих инструментов, заключающаяся в определении периода стойкости инструмента на основании полученной аналитической зависимости периода стойкости от информативного параметра J_A переходного процесса виброакустического сигнала для заданной пары "обрабатываемый образец – режущий инструмент".

При создании непрерывно повторяющихся переходных процессов путем изменения подачи, были разработаны акустический и силовой методы определения граничных значений допустимого диапазона значений подачи для резания с фиксированной подачей. Нижняя граница при этом определяется с точки зрения качества обработанной по-

верхности и точности обработки, а верхняя с точки зрения производительности.

Впервые доказана информативность переходных процессов в мощности главного привода станка и в виброакустическом сигнале для определения обрабатываемости металлов, которая позволяет по способности металлов противостоять упругой и пластической деформации на этапе врезания инструмента в испытуемый образец судить об их обрабатываемости и получать ее количественную оценку.

На основании общего анализа устройств контроля, диагностики и прогнозирования процесса резания разработаны принципы подхода к построению эффективных систем автоматического контроля, диагностики и прогнозирования.

Проведена оценка информативности информационных сигналов различной физической природы, которые могут быть использованы в системах контроля процесса резания.

Выбран и обоснован принцип иерархического построения систем автоматического контроля, повышающий точность и надежность автоматического контроля процесса резания.

На основании разработанного подхода к построению систем автоматического контроля, благодаря использованию информативного параметра переходного процесса в электромагнитной эмиссии, удалось построить принципиально новые системы касания высокой точности.

Кроме того разработано около 20 приборов и систем, использующих информативные параметры переходных процессов, которые контролируют и диагностируют почти все технологически значимые параметры процесса обработки.

Все системы и приборы отличаются более высокими техническими, экономическими и эксплуатационными показателями от существующих на Украине и зарубежных образцов аналогичного назначения.

Печатные труды по теме диссертации:

1. Махмудов К. Г., Мирзаев А. А., Ридванов И. Х. Прогнозирование износостойкости режущих инструментов для назначения режимов резания. // Технология и автоматизация машиностроения: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1990. - Вып. 46. - С. 69-73.
2. Махмудов К. Г. Использование нестационарных режимов сверления на станках с ЧПУ. // Технология и автоматизация машиностроения: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1992. - Вып. 49. - С. 53-57.

3. Махмудов К. Г., Остафьев В. А., Харкевич А. Г. Практическое использование динамической модели процесса резания металлов для повышения качества средств его диагностики // Высокие технологии в машиностроении: Тезисы докладов. - Харьков, 1992. - с. 197.
4. Махмудов К. Г., Скицк В. И. Интесификация лезвийной обработки металлов на основе высокоточных датчиков касания и контроля состояния режущего инструмента // Новые материалы и технологии машиностроения: Тезисы докл. Российск. науч.-техн. конф. - Москва, 1992. - с. 27.
5. Махмудов К. Г. и др. Способ определения оптимальной скорости резания в процессе обработки заготовки // А. С. №1202811. СССР.
6. Махмудов К. Г. и др. Устройство для контроля состояния инструмента // А. С. №1202745 СССР.
7. Махмудов К. Г. и др. Способ оценки обрабатываемости материалов // А. С. №1180757 СССР.
8. Махмудов и др. Устройство для определения состояния режущего инструмента в процессе резания // А. С. №1180756 СССР.
9. Махмудов К. Г. и др. Способ управления обработкой материалов резанием // А. С. №1757849 СССР.
10. Махмудов К. Г. и др. Система прогнозирования состояния режущих инструментов // А. С. №1734958 СССР.
11. Махмудов К. Г. и др. Управление процессом сверления при выходе на станках с ЧПУ // Робототехника и автоматизация производственных процессов: Тезисы докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Барнаул, 1983. - С. 82-83.
12. Махмудов К. Г. Влияние тепловых явления на стойкость сверла // Теплофизика технологических процессов: Тезисы докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Ташкент, 1984. - С. 66.
13. Махмудов К. Г., Науменко В. И. Устройство диагностики процесса резания // Главный комитет ВДНХ УССР. - 1985.
14. Махмудов К. Г., Фаязиматов Б. Н., Мирзаев А. А., Ридванов И. Х. Рациональное использование спиральных сверл на станках с ЧПУ. // Пути повышения качества и надежности инструмента: Тезисы докл. зональной науч.-техн. конф. - Барнаул, 1989. - С89-91.
15. Махмудов К. Г., Фаязиматов Б. Н., Мирзаев А. А. Ускоренный метод определения обрабатываемости материалов // Опыт разработки и внедрения технологических и конструкторских ре-

- шений интенсификации процесса резания: Тезисы докл. республиканского семинара. - Киев, 1989. - С. 9.
16. Махмудов К. Г., Фаязиматов Б. Н., Акбаров К. К. Переходные процессы при резании как объект исследования // Молодежь и научно-технический прогресс: Тезисы докл. -практич. конф. молодых ученых и специалистов. - Фергана, 1988. - С. 60-61.
 17. Махмудов К. Г., Рахимов А. А., Ридванов И. Х. Система диагностики работоспособности сверл // Интенсификация технологических процессов механической обработки: Тезисы докл. Всесоюзн. науч. -техн. конф. - Ленинград, 1986.
 18. Махмудов К. Г., Мирзаев А. А., Скишук В. И. Контроль процесса резания на основе виброакустического сигнала // Тезисы докладов Всесоюзн. науч. - техн. конф. советских и польских молодых ученых - выпускников ВУЗов СССР. - Киев, 1986.
 19. Махмудов К. Г. Диагностика и интенсификация процесса сверления титановых сплавов на станках типа "обрабатывающий центр" // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Киев, 1985. - 17с.
 20. Махмудов К. Г., Фаязиматов Б. Н., Ридванов И. Х. Интенсификация режимов сверления на станках с ЧПУ // Опыт разработки и внедрения технологических и конструкторских решений интенсификации процессов резания: Тезисы докл. республиканского семинара. - Киев, 1989. - С. 9.
 21. Загорев С. В., Махмудов К. Г. Влияние типа заточки спирального сверла на точность обработки отверстия на станках с ЧПУ // Технология и автоматизация машиностроения: Респ. межвед. науч. -техн. сб. - 1984 - Вып. 34 - С. 41-43.
 22. Новицкий А. А., Ноценко А. Н., Махмудов К. Г. Исследование обрабатываемости прецизионного сплава высокого демпфирования 15ХЮ-ИД // Типовые механизмы и технологическая оснастка станков-автоматов, станков с ЧПУ и ГПС/"СТАНКИ-91"/ Тезисы науч. техн. конф. - Киев, 1991. - с. 66.
 23. Остафьев В. А., Махмудов К. Г., Кокаровцев В. В., Науменко В. И., Скишук В. И. Контроль состояния и размерная настройка инструмента на станках с ЧПУ // Технология и автоматизация машиностроения: Респ. межвед. науч. - техн. сб. - 1992 - Вып. 49 - С. 61-65.
 24. Остафьев В. А., Махмудов К. Г., Скишук В. И. Автоматическая настройка и позиционирование инструмента на станках с ЧПУ // Технология и автоматизация машиностроения: Респ. межвед. науч. - техн. сб. - 1992. - Вып. 49. - С. 66-68.

25. Остафьев В. А., Махмудов К. Г., Харкевич А. Г. Интенсификация лезвийной обработки металлов на основе моделирования процесса резания // Новые материалы в технологии машиностроения: Тезисы докл. Российск. науч. - техн. конф. - Москва, 1992. - С. 26.
26. Остафьев В. А., Махмудов К. Г. Резервы повышения качества при последовательной обработке отверстий резанием // Типовые механизмы и технологическая оснастка станков-автоматов, станков с ЧПУ и ГПС / "СТАНКИ-91" / Тезисы науч. техн. конф. - Киев, 1991. - с. 51.
27. Остафьев В. А., Махмудов К. Г., Остафьева Р. С. Диагностика процесса металлообработки // Высокие технологии в машиностроении: Тезисы докладов. - Харьков, 1992. - с. 113.
28. Остафьев В. А., Махмудов К. Г., Кокаровцев В. В. повышение надежности процесса сверления // Деп. УкрНИИТИ, н 168 УК-84, 1985. - 8 с.
29. Остафьев В. А., Махмудов К. Г. и др. Исследование связи параметров процесса сверления с параметрами виброакустического сигнала // технологические пути экономии трудовых и материальных ресурсов и интенсификации производства в приборостроении: Тезисы докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Москва, 1987 - С. 82-83.
30. Остафьев В. А., Махмудов К. Г., Усенко Р. В. Интенсификация процесса сверления путем применения переменных режимов сверления на станках с ЧПУ // Методы повышения производительности и качества обработки деталей на оборудовании автоматизированных производств: Тезисы докл. зональной науч. - технич. конф. - Андропов, 1985. - С. 66.
31. Остафьев В. А., Кокаровцев В. В., Махмудов К. Г., Камаев Ю. Н., Науменко В. И., Воскобойник Ю. И. Система прогнозирования состояния режущих инструментов и процесса резания // А. с. ЧССР н 6102-89.
32. Остафьев В. А., Кокаровцев В. В., Махмудов К. Г., Камаев Ю. Н., Науменко В. И., Воскобойник Ю. И. Система прогнозирования состояния режущих инструментов и процесса резания // Патент ФРГ н 23 в / 3329885 .
33. Скицук В. Г., Махмудов К. Г., Ключко Т. Р. Технология ТОНТОР. -К. Техника, 1993. - 80 с.

34. Фаязаматов Б. Н., Махмудов К. Г., Отакулов О. Х. // Автоматизация технологической подготовки ГПС // Автоматизированное проектирование ГПС многономенклатурного производства: Тезисы докл. науч.-техн. конф. - Киев. 1991, с. 7.
35. V. Ostafiev, D. Ostafiev, K. Mukhamedov : Distribution of Cutting Tool Contact Loads along Rake and Flank Surface, Annals of the CIRP, 43-1(1994).

смайл

Подп. в печ. 5.04.94 . Формат 60x84/16. Бумага тип. Офс. печать.
Усл. печ, л. 2.09 . Усл. кр.-отт. 2.09 . Уч.-изд. л. 1.8.
Тираж 200 экз. Зак. 95 Бесплатно.

Отпечатано в Институте математики АН Украины
252601 Киев 4, ГСП, ул. Терещенковская, 3

AB 29.565

AB 29.565