

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР



Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

ТВЕРСКОЙ Михаил Михайлович.

Кандидат технических наук, доцент

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ОПТИМАЛЬНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ПРОЦЕССАМИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ
ИНСТРУМЕНТАМИ МАЛОЙ ПРОЧНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ

Специальность 05.02.08 - "Технология
машиностроения"

Автореферат
диссертации на соискание ученой сте-
пени доктора технических наук

Челябинск
1975

Работа выполнена на кафедре "Технология машиностроения"
Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомо-
ла.

Официальные оппоненты:

БАЗРОВ Б.М. - доктор технических наук, лауреат Ленинской премии
(г.Москва);

КОГАНОВ И.А. - доктор технических наук, профессор
(г.Тула);

ЧЕРНОРУЦКИЙ Г.С. - доктор технических наук, профессор, заслужен-
ный деятель науки и техники РСФСР
(г.Челябинск).

Ведущее предприятие - Челябинский тракторный завод имени
В.И.Ленина.

Автореферат разослан "___" _____ 1975 г.

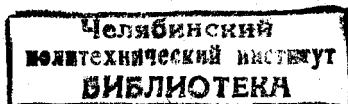
Защита диссертации состоится "___" _____ 1975 г.,
в 15 часов, в аудитории 244 на заседании Совета по присуждению
ученых степеней Челябинского политехнического института имени
Ленинского комсомола (454044, г.Челябинск, 44, проспект им.В.И.
Ленина, 76).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся
темой диссертации, принять участие в заседании Совета или прислать
отзыв (в двух экземплярах, заверенных печатью).

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
доктор технических наук, профессор


(В.В.МАТВЕЕВ)



А Н Н О Т А Ц И Я

В диссертации изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований, позволивших создать технологические основы оптимального автоматического управления процессами механической обработки на металлорежущих станках. Теоретические исследования выполнены на базе современной математической теории оптимального управления (принципа максимума Л.С.Понтрягина и метода динамического программирования Р.Беллмана).

В качестве объекта исследования приняты операции, выполняемые с использованием инструмента малой прочности и жесткости, на которых традиционные для машиностроительной автоматики системы с жестко запрограммированным режимом обработки неэффективны.

Разработаны алгоритмы оптимального управления конкретными процессами глубокого сверления отверстий малого диаметра, фрезерования узких пазов и внутреннего шлифования.

Созданные на основе разработанных алгоритмов системы автоматического управления внедрены в производство со значительным экономическим эффектом.

Важнейшие теоретические результаты работы имеют общий характер и могут служить основой при создании систем оптимального управления различными процессами обработки.

АВТОР ЗАЩИЩАЕТ

1. Постановку и способ аналитического решения задачи оптимального управления процессами механической обработки (общий и частные случаи).

2. Методы нахождения алгоритмов оптимального управления процессами механической обработки инструментами малой прочности и жесткости.

3. Схемы автоматического управления рассматриваемыми процессами, сочетающие в себе преимущества разомкнутых аналитических систем оптимального управления и систем с отрицательными обратными связями (замкнутых).

4. Разработанные упрощенные методы математического описания и аналитического исследования систем управления подачей для металлорежущих станков, облегчающие синтез таких систем на основе строго обоснованных в работе требований к показателям их качества.

5. Эффективность способов реализации разработанных алгоритмов

в созданных системах автоматического управления рассматриваемыми процессами обработки.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Автоматизация производства является одним из основных путей повышения производительности общественного труда. В области автоматизации машиностроительного производства достигнуты значительные успехи (станки с ЧПУ, станки и станочные системы с непосредственным управлением от ЭВМ и т.п.).

Однако традиционные для металлорежущих станков системы автоматического управления с жестко запрограммированным режимом обработки при выполнении некоторых операций неэффективны. Примерами могут служить операции, выполняемые инструментом малой прочности и жесткости, задача эффективной автоматизации которых до настоящего времени не решена. Эта задача должна решаться с привлечением методов современной теории управления, в том числе методов оптимизации управления с целью достижения наилучших технико-экономических показателей.

Оптимальное управление в настоящее время является основным средством повышения эффективности автоматизированных систем, включая и металлорежущие станки. Экономический эффект, получаемый при переходе к оптимальному управлению многими процессами, сопоставим с эффектом, полученным в свое время при переходе от механизации этих процессов к их автоматизации.

Поэтому создание систем оптимального автоматического управления процессами механической обработки является актуальной научной проблемой.

Однако создание систем оптимального управления невозможно без теоретической разработки его технологических основ, которая включает в себя формирование критерия оптимальности, нахождение алгоритма управления, выработку обоснованных требований к качественным показателям систем управления и т.п.

Цель работы - создание технологических основ оптимального автоматического управления процессами механической обработки, осуществляемыми с использованием инструментов малой прочности и жесткости, и разработка эффективных систем автоматического управления этими процессами.

Общая методика исследований. В теоретической части работы на основе технико-экономического анализа процессов механической обработки выбран критерий оптимальности, получено математическое выражение целевого функционала, сформулирована задача оптимального управления

процессом и предложен метод ее решения для общего случая.

Дальнейшее аналитическое исследование позволило свести задачу оптимального управления к поиску минимума целевой функции при наличии ограничений.

На основе анализа целевой функции и ограничений разработаны формализованные методы нахождения алгоритмов и схемы оптимального управления для рассматриваемых процессов обработки.

Аналитическая часть работы включает и обоснование требований к динамическим показателям систем управления подачей для металлорежущих станков, а также разработку упрощенных методов математического описания и анализа динамики таких систем.

На основе экспериментальных исследований конкретных процессов обработки получены стойкие зависимости и математические выражения ограничений, необходимые для нахождения алгоритмов управления по разработанной методике.

Экспериментальная часть работы включает и реализацию найденных алгоритмов, т.е. создание, лабораторные и производственные испытания новых систем управления и станков с такими системами.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Впервые задача оптимизации механической обработки по всем параметрам режима сформулирована как задача оптимального управления.

2. Найдено аналитическое решение этой задачи для общего и частных случаев.

3. Впервые предложены формализованные экспериментально-аналитические методы нахождения алгоритмов оптимального управления для достаточно широкого класса процессов механической обработки.

4. Для рассматриваемых процессов предложены эффективные и достаточно простые схемы управления, сочетающие в себе принципы и достоинства разомкнутых (аналитических) систем оптимального управления и замкнутых отрицательной обратной связью систем стабилизации.

5. Впервые строго обоснованы требования к динамическим показателям систем управления подачей при различных видах механической обработки.

6. Для систем управления подачей металлорежущих станков, описываемых дифференциальными уравнениями с запаздывающим аргументом, разработаны упрощенные методы математического описания систем и аналитического исследования переходных процессов, значительно облегчающих синтез таких систем.

Практическая полезность работы определяется непосредственными результатами ее реализации (см. ниже), а также следующим:

1. Найденные в работе необходимые условия минимума целевой функции позволяют при поиске оптимального режима определить область, в которой аппроксимация экспериментальных стойкостных зависимостей аналитическими функциями должна проводиться особенно строго, а также облегчают выбор метода расчета оптимального режима на ЭВМ для различных видов обработки.

2. Предложенный в работе способ оптимизации многопроходной обработки с использованием метода динамического программирования может применяться не только при глубоком сверлении, но и при других видах многопроходной обработки.

3. Основные теоретические результаты работы (постановка и метод решения задачи оптимального управления процессом механической обработки, результаты исследования целевых функций и т.д.) имеют общий характер и могут служить основой при разработке систем оптимального управления различными процессами машиностроительного производства.

4. Метод аппроксимации трансцендентной передаточной функции звена, формирующего толщину среза, и частотный метод приближенного описания переходного процесса в системах с запаздыванием аргумента, предложенные в работе, облегчают анализ и синтез систем управления подачей для металлорежущих станков в инженерной практике.

5. Найденные при выполнении данной работы конструктивные решения отдельных узлов (динамометрические планетарные редукторы, регуляторы подачи и т.п.) и систем управления в целом применяются многими организациями страны при создании систем управления различными процессами обработки и сборки.

Реализация работы. На Челябинском тракторном заводе им. Ленина, Златоустовском машиностроительном заводе им. Ленина, Челябинском заводе тракторных агрегатов и других заводах в 1967-1974 годах внедрены 28 станков, модернизированных или изготовленных в лаборатории кафедры. Станки оборудованы системами автоматического управления, созданными на основе теоретических разработок автора и под его руководством, и используются на операциях, выполняемых инструментами малой прочности и жесткости (сверление глубоких отверстий диаметром менее 2 мм в различных материалах, фрезерование узких пазов, внутреннее шлифование). Общий годовой экономический эффект от внедрения указанных станков, согласно приложенным к работе актам внедрения, составил около 150 тыс. рублей.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации автором докладывались:

1. На Всесоюзной научно-технической конференции "Технологические методы повышения точности, надежности и долговечности в машиностроении", Одесса, 1966.

2. На межвузовской научной конференции "Повышение точности и производительности обработки путем управления упругими перемещениями станка", Москва, 1967.

3. На конференции научных работников, посвященной 50-летию Советской власти, Челябинск, 1967.

4. На отраслевом научно-техническом совещании "Повышение точности и надежности металлорежущих станков путем применения адаптивных корректирующих систем", Ленинград, 1970.

5. На научно-технической конференции вузов Урала по машиностроению, Ижевск, 1970.

6. На Всесоюзном семинаре-совещании "Повышение производительности металлорежущих станков и точности обработки путем применения адаптивных систем", Ленинград, 1973.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 30 печатных работ, в том числе пять авторских свидетельств на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации: 300 страниц текста, 56 иллюстраций и 10 приложений (в том числе 7 актов внедрения). Спикок литературы содержит 175 наименований. Общий объем работы составляет 394 страницы.

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- Е** - приведенные хозрасчетные затраты предприятия, обусловленные одной минутой работы станка и рабочего без затрат на режущий инструмент, коп./станко-мин;
- И** - приведенные хозрасчетные затраты предприятия, обусловленные эксплуатацией режущего инструмента за период его стойкости (полный период работы шлифовального круга), включая затраты на переточку (правку) и заработную плату наладчика, коп.;
- В** - ширина (осевая глубина) фрезерования, мм;
- D** - диаметр инструмента, мм;
- h_п** - глубина прижога при шлифовании, мм;
- L** - глубина отверстия (текущая), мм;
- e** - величина углубления сверла на данном проходе, мм;

- M - величина крутящего момента на инструменте, кгс.м;
 N - число деталей, обработанных за период стойкости инструмента (одним шлифовальным кругом);
 n - число оборотов в 1 мин.;
 P - величина осевой силы при сверлении; величина силы резания на отдельном зубе фрезы, кгс;
 Q - интенсивность съема припуска при шлифовании, см³/мин.;
 $Q_{\text{ш}}$ - интенсивность расхода абразива при шлифовании, см³/мин.;
 S - подача на один оборот, мм/об.;
 $S_{\text{м}}$ - минутная подача, мм/мин.;
 $S_{\text{т}}$ - врезная подача при шлифовании, мм/мин.;
 $S_{\text{з}}$ - подача на один зуб фрезы, мм/зуб;
 T - период стойкости инструмента, мин.;
 t - глубина резания, глубина фрезерования, мм;
 V - скорость резания, м/мин.;
 Z - припуск на обработку, мм;
 $Z_{\text{и}}$ - число зубьев инструмента;
 Δ - текущая величина износа режущего инструмента, мм;
 $\Delta_{\text{т}}$ - допустимая величина износа режущего инструмента, мм;
 $\Delta_{\text{ш}}$ - полезно используемый объем шлифовального круга, см³;
 ε - величина эксцентриситета, мм;
 τ - текущее время, мин (с);
 $\tau_{\text{м}}$ - машинное время, мин;
 $\tau_{\text{о}}$ - время одного оборота заготовки, время поворота фрезы на один угловой шаг между зубьями, с;
 $\tau_{\text{см}}$ - продолжительность простоя станка, связанного со сменой режущего инструмента (и всеми правками шлифовального круга), мин;
 ω - круговая частота, с⁻¹.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенного анализа было выявлено, что даже на заводах массового производства при относительно высоком общем уровне автоматизации отдельные операции выполняются на станках с ручной подачей инструмента. Автоматизированные станки на ряде операций либо не используются, либо работают крайне неэффективно - с большим количеством брака, с низкой производительностью, с большим расходом режущего инструмента.

Одна из основных причин такого положения - малая прочность

инструмента и низкая жесткость технологической системы. Поскольку в большинстве случаев на таких операциях обрабатываются охватывающие поверхности - отверстия или пазы - то жесткость технологической системы, определяемая жесткостью инструмента, не может быть сколько-нибудь значительно повышена.

Наиболее типичными примерами являются: сверление отверстий малого (менее 2 мм) диаметра, в особенности глубоких, фрезерование узких пазов и внутреннее шлифование. Из-за отсутствия или неудовлетворительной работы автоматизированных станков эти операции, как правило, являются "узким местом" производства.

Изменения характеристик обрабатываемого материала, качества изготовления, заточки и степени затупления режущего инструмента, величины припуска на обработку, глубины фрезеруемого паза, текущей глубины сверления и многих других параметров при обработке с заранее запрограммированным режимом приводят к неконтролируемым изменениям нагрузки на инструмент и к значительным колебаниям его стойкости.

Получить заданные качественные показатели обрабатываемой детали можно только при работе с уменьшенным сечением среза. Это значительно снижает производительность обработки и далеко не во всех случаях гарантирует отсутствия поломок инструмента, приводящих к браку.

Производя обработку при малых сечениях среза, можно значительно повысить ее эффективность, увеличивая скорость резания путем замены материала инструмента на более теплостойкий или путем улучшения условий охлаждения инструмента.

Однако при рассматриваемых видах обработки реализация указанных резервов повышения скорости резания затруднена вследствие малых размеров инструмента, обусловленной этим необходимостью применения высокооборотных шпинделей и других причин.

Анализ возможности замены существующих методов обработки на рассматриваемых операциях новыми показал, что при современном уровне техники такая замена экономически нецелесообразна.

Отмеченное выше свидетельствует о том, что резервы повышения эффективности рассматриваемых операций следует искать прежде всего в совершенствовании систем автоматического управления процессами обработки. Поскольку традиционные для машиностроительной автоматики циклические (неинформационные) системы управления оказались на указанных операциях неэффективными, необходимо заменить их системами, осуществляющими управление с использованием информации о действительном ходе процесса обработки.

При этом из-за жестко ограниченных возможностей инструмента (в отношении прочности, жесткости и износостойкости) сразу же возника-

ет задача их оптимального использования, т.е. задача оптимального управления процессом обработки при наличии жестких ограничений на параметры режима.

До последнего времени задача оптимизации режима формулировалась как задача определения наиболее выгодного сочетания V , S , ℓ для вполне определенных условий обработки. Вероятностные методы расчета оптимального режима разработаны слабо.

Значительные отклонения условий обработки от расчетных снижают ценность детерминированного метода расчета оптимального режима. Это обстоятельство явилось одной из причин появления систем автоматического управления режимом, открывающих возможность оптимизации процесса обработки. Общая идея применения таких систем принадлежит Б.С.Балакшину.

Первые системы были одноконтурными и предназначались для решения частных задач (автоматическая стабилизация составляющих силы резания, величины упругих деформаций, температуры в зоне резания и т.п.). В дальнейшем (работы Ю.М.Соломенцева) появились многомерные системы, предназначенные для решения более общих задач оптимизации процессов обработки.

При обработке с переменным режимом критерии оптимальности должны выражаться в виде функционалов, определенных на функциях, выражающих изменение всех параметров режима во времени. Аналитические выражения стойкости инструмента через параметры режима терпят при этом свой первоначальный смысл. Однако вполне корректной постановки задачи оптимального управления процессами механической обработки пока не найдено.

В литературе по этому вопросу преобладает мнение, что оптимизация режима может быть достигнута применением многомерных систем, стабилизирующих отдельные физические параметры процесса обработки (силу резания, температуру в зоне резания и т.п.).

Это мнение в значительной мере основано на следующих положениях, развитых в работах расчетного характера. Если критерий оптимальности выразить в виде некоторой целевой функции (но не функционала), аргументами которой являются мгновенные значения параметров режима, а продолжительность работы инструмента определять традиционными зависимостями $T(V, S, \ell)$, то для конкретного сочетания глубины резания, характеристик обрабатываемого материала и прочих условий обработки всегда можно найти оптимальное сочетание V и S . Ввиду нелинейного характера целевой функции и ограничений эта задача в общем случае не имеет аналитического решения и должна рассматриваться как задача нелинейного программирования.

Если целевая функция выражает затраты на обработку, например ее себестоимость, а используемая зависимость $T(V, S, t)$ имеет традиционный вид степенной функции (расширенного уравнения Тейлора), то в этом случае целевая функция внутреннего минимума не имеет, и ее наименьшее значение лежит на границе допустимой области, в формировании которой в общем случае участвует достаточно большое число ограничений.

Если при этом ограничения можно с достаточной точностью выразить также с помощью степенных функций вида $S = C_s t^\alpha V^\beta$, то допустимая область $V-S$ при изображении ее в логарифмических координатах имеет вид многоугольника. Оптимальный режим соответствует точке, лежащей либо на грани, либо на вершине этого многоугольника. Если точка оптимального режима при изменении (в определенном диапазоне) условий обработки, например глубины резания, определяется одним каким-либо ограничением (лежит на грани многоугольника), то оптимальный режим соответствует вполне определенной постоянной стойкости инструмента. Величина этой стойкости при прочих неизменных условиях зависит от показателя β в уравнении данного ограничения.¹⁾ Поэтому оптимизация режима в рассматриваемом диапазоне изменения условий обработки достигается стабилизацией стойкости и того физического параметра, который соответствует данному ограничению. Если точка оптимального режима при изменении условий обработки в определенном диапазоне соответствует вершине многоугольника, то оптимизация режима достигается стабилизацией двух параметров, соответствующих ограничениям, образующим данную вершину.

При изменении условий обработки допустимая область параметров режима смещается и деформируется. При этом в формировании ее границ начинают участвовать новые ограничения, каждому из которых соответствует свое значение наиболее выгодной стойкости. Поскольку методы идентификации (распознавания) возмущений для данных систем пока не разработаны, то установить какую-либо закономерность в смене пар стабилизируемых параметров не удастся, и алгоритм управления оказывается в значительной степени неопределенным.

Вопросы построения аналитических систем оптимизации режима, для реализации которых требуется значительный объем априорной инфор-

1) Этин А.О. и др. Расчет режимов резания для обработки на металло-режущих станках. "Вестник машиностроения", 1972, №5.

мации о процессе, при других видах стойкостной зависимости практически не рассматривались. Но известны работы, в которых показано, что при более точной аппроксимации экспериментальной стойкостной зависимости целевая функция в ряде случаев имеет внутренний минимум. Построение систем оптимизации для этих случаев еще более затруднено. Задача оптимизации режима в этом случае может быть решена экстремальной системой поискового типа. Такая система для механической обработки впервые была создана фирмой *Bendix* (США). Критерием оптимальности в ней принято следующее выражение (показатель "мгновенной" эффективности):

$$H = \frac{Bstn}{E + (E\epsilon_{cm} + KI)(\Delta/\Delta_T)}, \quad (I)$$

где $0 \leq K \leq 1$ - постоянный коэффициент.

При $K=1$ величина, обратная H , выражает "мгновенную" величину затрат на съем I мм³ материала. Поскольку задача максимизации (I) в любой момент времени некорректна, то задачей рассматриваемой системы является достижение максимального среднего значения показателя H на заданном весьма коротком отрезке времени. Многошаговый процесс поиска максимально возможного значения H далеко не при всех условиях обработки будет сходящимся. При реализации системы основную сложность представляет измерение интенсивности износа Δ . В рассматриваемой системе принят косвенный метод оценки Δ , в основу которого положена корреляционная зависимость между Δ и параметрами режима, температурой в зоне резания и интенсивностью изменения крутящего момента на фрезе во времени. Указанная зависимость представляет по сути математическую модель процесса, для построения которой требуется значительный объем априорной информации. Это до некоторой степени лишает данную поисковую систему ее основного преимущества перед аналитическими, эффективность которых определяется адекватностью принятой математической модели процесса.

Таким образом, изложенное выше свидетельствует о том, что к настоящему времени не разработаны достаточно общие принципы и формализованные методы построения систем автоматической оптимизации, опираясь на которые можно было бы разрабатывать такие системы для конкретных процессов механической обработки. Недостаточной разработкой технологических основ оптимального управления процессами механической обработки во многом объясняется и то, что созданные к настоящему времени системы управления для одних и тех же процессов имеют самые различные схемы и алгоритмы функционирования.

Вместе с тем большое разнообразие видов обработки, условий выполнения операций и предъявляемых к ним требований чрезвычайно затрудняет разработку обобщенных моделей критериев и алгоритмов. Поэтому в настоящей работе сделана попытка на основе изучения и анализа общих вопросов оптимизации процессов обработки предложить формализованные методы оптимизации тех операций, для которых управление с жестко запрограммированным режимом особенно малоэффективно. При таком подходе к проблеме разработанные методы управления будут пригодны не только для рассматриваемых в работе процессов, но и для многих других, математические модели которых окажутся подобными рассматриваемым.

В соответствии с поставленной целью и всем изложенным выше были сформулированы следующие основные задачи исследования:

1. Выбрать цель управления технологической операцией, сформулировать критерий оптимальности и провести анализ математического выражения, принятого в качестве критерия оптимальности.
2. Разработать алгоритмы и принципиальные схемы оптимального управления процессами обработки, осуществляемыми с использованием инструмента малой прочности и жесткости.
3. Изучить основные закономерности протекания процессов обработки при регулировании параметров режима с целью выработки обоснованных требований к динамическим показателям качества систем управления.
4. На основании теоретических разработок создать эффективные системы управления, провести их экспериментальные исследования и производственные испытания.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА

Выбор критерия оптимальности. Задача оптимизации процесса обработки на отдельной операции должна рассматриваться как часть более общей задачи оптимизации всего технологического процесса изготовления детали. Однако для решения общей задачи необходимо математически описать сложные внутри- и межоперационные связи между режимом, качеством и экономическими показателями обработки. На данном этапе развития технологии машиностроения описать эти связи можно лишь весьма приближенно. Сформулировать критерий оптимальности для отдельно рассматриваемой операции можно лишь после того, как путем технико-экономического расчета будут установлены требования к качеству обработки на ней. В этом случае целью технологической опе-

рации является достижение требуемых технологическим процессом точности и качества обрабатываемых поверхностей при минимальных затратах общественного труда. Затраты всех видов труда в денежном выражении могут быть оценены различными показателями. В данной работе критерием оптимальности режима принята величина приведенных хозрасчетных затрат предприятия на выполнение технологической операции (1):

$$\Pi_x = C_x + \epsilon_{нх} K, \quad (2)$$

где C_x - величина годовых хозрасчетных издержек предприятия, связанных с выполнением данной операции;

K - капитальные вложения, приходящиеся на данную операцию;

$\epsilon_{нх}$ - нормативный коэффициент хозрасчетной эффективности дополнительных капитальных вложений.

Формирование целевой функции. Переменную, зависящую от режима, часть приведенных хозрасчетных затрат предприятия, обусловленных однократным выполнением данной операции, можно выразить формулой:

$$C_{пх} = \tau_m E + \frac{\tau_{см}}{N} E + \frac{II}{N} \quad (3)$$

Выразив τ_m и N через параметры режима и стойкость инструмента, после упрощений получим математическое выражение критерия оптимальности для случая обработки с неизменными параметрами режима в виде следующей целевой функции:

$$\Theta = \frac{E}{vst} + \frac{E\tau_{см} + II}{vstT(v, s, t)} \quad \frac{\text{коп.}}{\text{см}^3} \quad (4)$$

Целевая функция (4) выражает средние за период стойкости инструмента затраты²⁾, отнесенные к объему снятого материала, а при заданном значении ϵ - затраты на единицу обработанной площади.

При обработке с переменными параметрами режима величина средних за период стойкости инструмента затрат, приходящаяся на 1 см³ снятого материала, выражается функционалом

1) Великанов К.М., Новожилов В.И. Экономичные режимы резания металлов. "Машиностроение", Л., 1972.

2) Термином "затраты" здесь и в дальнейшем обозначена зависящая от режима часть приведенных хозрасчетных затрат предприятия.

$$\Theta = \frac{E(T + \tau_{cm}) + M}{\int_0^T v(\tau) s(\tau) \ell(\tau) d\tau}, \quad (5)$$

в котором величина T определяется соотношением:

$$\int_0^T \dot{\Delta}(\tau) d\tau = \Delta_T. \quad (6)$$

Решающим при постановке задачи оптимального управления процессом обработки является вопрос выбора аргументов аппроксимирующей функции, описывающей зависимость интенсивности износа инструмента от изменяющихся условий его работы. В основу выбора вида этой функции легли следующие положения:

а) Интенсивность износа в данный момент времени не зависит от предыстории процесса, т.е. от того, по какому закону изменялась величина износа до этого момента, от величины обработанной площади и т.п. Таким образом, процесс износа представляется процессом без последствия, автономным (рассматривается процесс обработки в установившемся тепловом режиме). Это означает, что аппроксимирующая функция для интенсивности износа не должна содержать время τ в качестве аргумента.

б) Интенсивность износа зависит не только от текущих условий и параметров режима обработки, но и от того, какова в данный момент величина износа.

На основании изложенного запишем

$$\dot{\Delta} = \frac{d\Delta}{d\tau} = F(\Delta, v, s, t). \quad (7)$$

В самом общем виде задача оптимального управления процессом обработки может быть сформулирована следующим образом: необходимо найти такие законы изменения параметров режима во времени, которые обеспечивают минимум средних затрат, приходящихся на 1 см³ снятого металла (или на единицу обработанной площади). При этом время работы инструмента не задано, а определяется следующими граничными условиями:

$$\Delta(0) = 0; \quad \Delta(T) = \Delta_T. \quad (8)$$

терминах теории оптимального управления эта задача формулируется следующим образом. Поведение объекта описывается дифференциальным уравнением (7). Фазовой координатой является Δ , управлением — $\{v(\tau); s(\tau); \ell(\tau)\}$. Среди всех допустимых управлений, переводящих объект из положения $\Delta(0) = 0$ в положение $\Delta(T) = \Delta_T$, необходимо найти такое, для которого правая часть (5) принимает минимальное значение. По смыслу задачи ясно, что на управление наложены ограничения, поэтому для ее решения используем принцип максимума

0399036

Л.С.Понтрягина. Поскольку целевой функционал (5) имеет сложный вид, и классический путь решения здесь неприменим, задачу решаем в два этапа. На первом этапе считаем T параметром. В этом случае минимум (5) будет соответствовать максимальному значению функционала

$$J = \int_0^T v(\tau) s(\tau) t(\tau) d\tau. \quad (9)$$

Для (7) и (9) строим функцию Понтрягина и решаем задачу при граничных условиях (8). В результате ее решения можно найти $v(\tau, T)$; $s(\tau, T)$; $t(\tau, T)$. Подставив эти функции в (5), после вычисления определенного интеграла в знаменателе получим $G(T)$. После этого можно найти значение T , соответствующее минимуму этой функции. В результате решения всей задачи находится оптимальное управление $U(\tau)$ и оптимальная траектория $\Delta(\tau)$. С учетом последнего оптимальное управление может быть найдено в виде $U_{\Delta}\{v(\Delta); s(\Delta); t(\Delta)\}$, т.е. в общем случае оптимальные значения V , S и t определяются не только условиями выполнения операции, но и величиной износа инструмента Δ .

Насколько близким к оптимальному будет управление, при котором параметры режима не зависят от Δ ? Проведенное аналитическое исследование показало, что если правая часть (7) может быть представлена произведением четырех функций одного аргумента (или $F(\Delta, v, s, t) = f(\Delta) \cdot \varphi(v, s, t)$), то найденные указанным выше способом оптимальные V , S и t не являются функциями Δ . В этом случае целевой функционал (5) вырождается в целевую функцию (4), на основании которой при переменном t находится оптимальное управление $U_t\{v(t); s(t)\}$. Если принята зависимость (7) не отвечает указанным условиям, а t является величиной случайной, управление U_t будет близким к оптимальному "в среднем" - для большого числа реализаций процесса ($\Delta_0 \rightarrow \Delta_T$). Таким образом, для большинства случаев обработки с переменным режимом задача оптимального управления процессом может быть сведена к поиску минимума целевой функции (4). При этом аргументами целевой функции являются "мгновенные" значения V , S и t , а величина T должна рассматриваться как "ожидаемая" при данных условиях стойкость инструмента.

Найдены необходимые условия внутреннего минимума целевой функции (4), одна из форм записи которых имеет вид:

$$\frac{\partial(\ln T)}{\partial(\ln v)} = \frac{\partial(\ln T)}{\partial(\ln S)} = \frac{\partial(\ln T)}{\partial(\ln t)} < -1. \quad (10)$$

Найденные условия позволяют выделить на экспериментальных кривых $T(v); T(s); T(t)$ участки, на которых могут находиться точки оптимального режима. Аппроксимации этих участков аналитическими функциями должна производиться с наибольшей точностью. На кривых $T(v)$ и $T(s)$, изображенных в логарифмических координатах, эти участки лежат ниже точек, соответствующих такой скорости резания или подаче, при которых площадь поверхности, обработанной за период стойкости инструмента, достигает максимума. В этих точках угол наклона касательных равен минус 45° . Применяя найденные условия к различным видам стойкостных зависимостей, можно непосредственно по виду аппроксимирующей функции $T(v, S, t)$ определить, может ли минимум затрат на обработку соответствовать какой-либо внутренней точке или должен отыскиваться на границе допустимой области.

В работе подробно исследовано поведение целевой функции (4) при использовании нескольких видов аппроксимирующих стойкостных зависимостей. Рассмотрим два типичных случая.

Наиболее часто экспериментальные стойкостные зависимости аппроксимируются степенной функцией вида:

$$T = \frac{C_T}{V^m S^p t^q} \quad , \quad (11)$$

которую называют расширенным уравнением Тейлора. При использовании (II) функция (4) внутреннего минимума не имеет, однако частные минимумы по двум аргументам V и S могут быть найдены. На плоскости $\ln v - \ln S$ геометрическим местом точек, соответствующих частным минимумам, являются две параллельные прямые. Их уравнения могут быть получены подстановкой в левую часть (II) следующих постоянных значений (соответственно):

$$T_v = \left(\tau_{cm} + \frac{H}{E} \right) (M - 1); \quad (12)$$

$$T_s = \left(\tau_{cm} + \frac{H}{E} \right) (V - 1). \quad (13)$$

Исследование производной по направлению этих прямых показало, что значение θ уменьшается при уменьшении V и соответствующем увеличении S .

Выражение (12) широко известно, значение T_V называют экономической стойкостью. Выражение (13) почти не встречается в литературе. Оно определяет оптимальную подачу при заданной скорости резания. Обычно (но далеко не всегда) оптимальное значение подачи лежит за пределами допустимой области.

Изменяя состав коэффициентов H и E на основании (12) и (13) можно получить значения стойкости, соответствующие другим критериям оптимальности: максимальной производительности ($H=0$), минимальной себестоимости и т.п. Следует отметить, что выражение (11) обеспечивает удовлетворительную точность аппроксимации в относительно узком диапазоне изменения параметров режима.

Более точную аппроксимацию дает функция вида:

$$T = \exp\left(d - \frac{a}{\kappa} v^\kappa - \frac{b}{m} s^m - \frac{c}{h} t^h\right). \quad (14)$$

Применяя к (14) условие (10), получим, что минимум затрат будет соответствовать точке, в которой выполняется условие:

$$av_*^\kappa = bs_*^m = ct_*^h \quad (15)$$

Это условие выполнимо, следовательно целевая функция (4) может иметь внутренний минимум. Поверхность отклика целевой функции для этого случая имеет вид чаши, показанной на рис.1. Оптимальные значения V_* и S_* при фиксированном t_i находятся из следующей системы трансцендентных уравнений:

$$T_V = \left(\tau_{cm} + \frac{H}{E}\right)(av_*^\kappa - 1); \quad (16)$$

$$T_S = \left(\tau_{cm} + \frac{H}{E}\right)(bs_*^m - 1); \quad (17)$$

в которых T_V и T_S означают правую часть (14).

Анализ некоторых других аппроксимирующих выражений показал, что при применении многих из них целевая функция (4) имеет внутренний минимум, а оптимальные сочетания V_* и S_* (для различных значений t) не характеризуются постоянством стойкости. Таким образом, рассмотренный выше случай является типичным и в наибольшей степени отвечает реальным условиям, т.к. выражение (14) обеспечивает, как правило, весьма точную аппроксимацию экспериментальной стойкостной зависимости.¹⁾

1) Экспресс-информация ВИНТИ, сер. "РИ", 1971, вып.45, реф.127.

Из изложенного выше следует, что характер изменения затрат на обработку при изменении параметров режима определяется закономерностями износа инструмента. Шлифование с этих позиций представляет собой более сложный процесс, чем обработка лезвийным инструментом. Одной из особенностей этого процесса является самозатачивание шлифовального круга, которое наблюдается при определенных условиях. Если процесс самозатачивания проявляется слабо, т.е. шлифовальный круг работает с преобладающим притуплением абразивных зерен, то абразив расходуется в основном при правках. В этом случае определение оптимальной интенсивности съема Q можно производить по той же целевой функции (4), что и для лезвийного инструмента. Принимая, что стойкость круга в одинаковой степени зависит от всех трех подач и может быть выражена зависимостью: $T = C_T Q^{-\kappa}$, на основании (4) находим оптимальную интенсивность съема:

$$Q_* = \left[\frac{C_T \nu}{(C_{cm} + \frac{H}{E})(\kappa - 1)} \right]^{\frac{1}{\kappa}}, \quad (18)$$

где ν — допустимое число правок шлифовального круга.

При работе круга с самозатачиванием для расчета оптимальной интенсивности съема следует использовать исходное уравнение (3), а количество деталей N , которые могут быть обработаны одним шлифовальным кругом, следует определять на основании зависимости:

$$Q_a = C_q Q^m.$$

В этом случае

$$Q_* = \left[\frac{\Delta a z}{C_q (C_{cm} + \frac{H}{E})(m-1)} \right]^{\frac{1}{m}}. \quad (19)$$

Таким образом, при обработке как лезвийным, так и абразивным инструментом целевая функция, выражающая затраты на обработку, может иметь внутренний минимум. Сочетание параметров режима, соответствующее минимуму целевой функции, определяется, в частности, величинами экономических показателей E и H , поэтому в общем случае не характеризуется экстремальными или фиксированными значениями физических параметров процесса обработки. Поэтому для оптимизации режима обработки в общем случае требуются достаточно сложные двумерные системы экстремального регулирования.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ
ОБРАБОТКИ, ВЫПОЛНЯЕМЫМИ ИНСТРУМЕНТОМ МАЛОЙ ПРОЧНОСТИ И
ЖЕСТКОСТИ

При решении вопроса о создании простых и надежных систем оптимального управления для конкретных операций необходимо проанализировать не только целевую функцию, но и ограничения. При обработке лезвийным инструментом малой прочности наиболее жесткими ограничениями, формирующими границу области допустимых сочетаний параметров режима, являются ограничения, обусловленные максимально допустимой силовой нагрузкой на инструмент. Таких ограничений обычно два.

Рассмотрим вначале случай с одним ограничением. Если зависимость $M(v, s, t)$ между параметрами режима, соответствующую данному ограничению, аппроксимировать с помощью степенной функции, то ограничивающая поверхность в логарифмических координатах имеет вид плоскости M_0 (рис.2). На каждой секущей плоскости t_i след ограничивающей поверхности в этом случае изображается прямой. Одна из таких прямых (CH) показана на рис.1.

Характерной особенностью рассматриваемых процессов является то, что линия ограничения не охватывает точку M (рис.1), являющуюся проекцией наименьшей точки выпуклой поверхности отклика целевой функции. В этих условиях точкой оптимального режима является наименьшая точка пространственной (в общем случае) кривой $D_0 B_0 H_0$ — точка B_0 .

Проекцией оптимальной точки является точка B , в которой линия ограничения касается одной из замкнутых линий равного уровня поверхности отклика. Геометрическим местом таких точек на рис.2 является кривая $B_0 B_i B_{i+1}$, лежащая на поверхности ограничения.

В геометрической интерпретации задачей оптимального управления в рассматриваемом случае является организация движения изображающей точки в пространстве параметров $v-s-t$ по этой кривой. Вследствие стохастического характера рассматриваемого процесса различными его реализациям будут соответствовать различные положения поверхности ограничения и форма расположенных на них кривых $B_0 B_i B_{i+1}$. Управление по жестким алгоритмам $v=f(t); s=\varphi(t)$ в данном случае малоэффективно.

Исследование показало, что минимумы на кривых $D_0 B_0 H_0$ (рис.1) весьма пологие, т.е. относительно небольшие смещения изображающей точки относительно точки B вдоль линии ограничения CH не вызывают существенного возрастания величины θ . В то же время

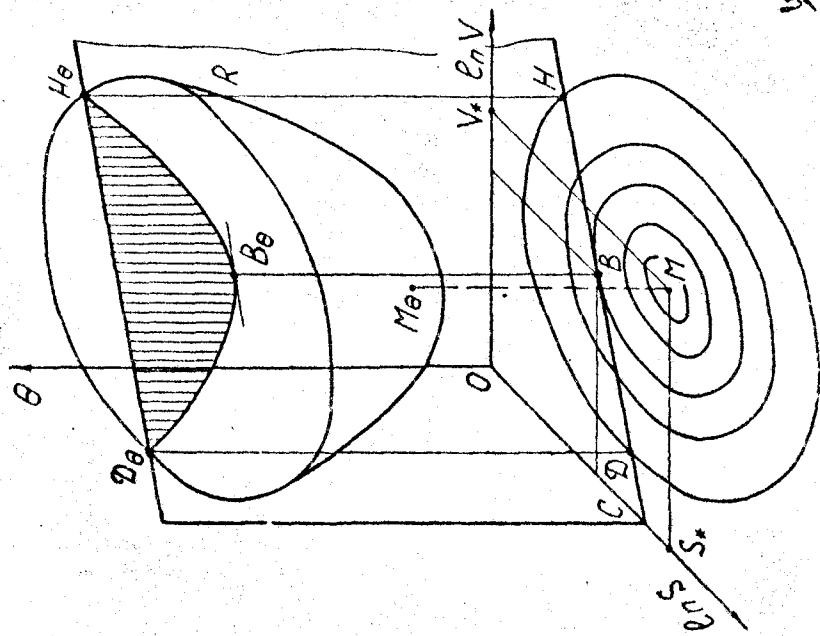


Рис. 1

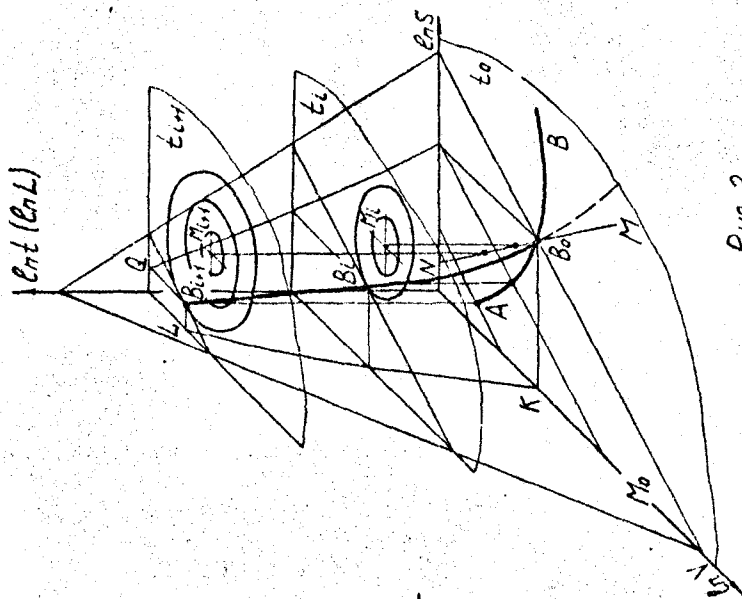


Рис. 2

смещение изображающей точки по нормали к линии ограничения, т.е. в направлении градиента функции Θ , вызывает, как известно, наиболее интенсивное возрастание величины Θ (или поломку инструмента).

Из этого следует, что для минимизации Θ в первую очередь необходимо, чтобы точка, изображающая на рис.2 режим обработки, находилась на фактической поверхности ограничения при любой реализации процесса. Наибольшую точность (в статике), как известно, обеспечивают системы с отрицательной обратной связью. Поэтому система оптимизации режима в данном случае должна иметь такую связь по ограничивающему силовому параметру. Но и при наличии такой связи линия ограничения (при каждом t) удовлетворяет бесконечное число сочетаний V и S , лишь одно из которых является оптимальным. Использованный при формировании отрицательной обратной связи характерный физический признак оптимальных сочетаний V и S (предельное значение нагрузки) является необходимым, но не достаточным. Других физических признаков в общем случае не имеется.

Оптимальные сочетания V и S соответствуют точкам пересечения линий ограничения с кривой AB (рис.2), являющейся проекцией кривой $B_0 B_1 B_{i+1}$ на плоскость $V-S$. Найдя уравнение этой кривой в виде $V=f(S)$ и используя найденную связь между параметрами режима в системе управления, получим достаточно простую, но эффективную систему управления. Эта система сочетает в себе преимущества замкнутых (точность) и разомкнутых (простота) систем управления.

Полученную на основании детерминированной математической модели процесса функциональную зависимость $V=f(S)$ следует рассматривать как математическое ожидание соответствующей случайной функции. Оптимальному управлению при конкретной реализации процесса будет соответствовать определенная реализация этой случайной функции. Однако при наличии отрицательной обратной связи по ограничивающему силовому параметру изображающая точка может несколько смещаться от оптимальной (для конкретной реализации процесса) только вдоль линии ограничения, т.е. в направлении наименьшей интенсивности изменения целевой функции. Это в значительной степени устраняет недостатки системы, связанные с использованием при ее построении детерминированной модели процесса.

Ранее отмечалось, что при обработке лезвийным инструментом малой прочности имеется, как правило, два жестких ограничения. Поэтому в общем случае система оптимизации режима, построенная по

указанной схеме, должна иметь два замкнутых контура управления параметрами режима (рис.3), в каждом из которых должен быть предусмотрен свой функциональный преобразователь 2 и 2' для управления скоростью резания в функции минутной подачи. Переключение управления с одного контура на другой осуществляется сравнивающим устройством I в тот момент, когда выходной сигнал измерительного устройства (ИУ) в отключенном контуре достигает предельного. Такую систему можно реализовать лишь в том случае, когда оба параметра силовой нагрузки (M и P) могут быть надежно измерены в процессе обработки. В противном случае приходится использовать только один контур, а для предотвращения чрезмерного возрастания неконтролируемого параметра ограничивать либо максимальное значение минутной подачи, либо задаваемое значение стабилизируемого параметра.

Изложенное выше позволяет свести задачу определения алгоритма оптимального управления для рассматриваемых процессов к задаче нахождения условного минимума целевой функции (4) при наличии ограничения, рассматриваемого здесь как уравнение связи:

$$M(v, s, L) = M_0 \quad (20)$$

В результате решения этой задачи найдено общее уравнение некоторой поверхности, при пересечении которой с поверхностью (20) образуется линия $B_0 B_1 B_2 \dots$ (рис.2). Это уравнение имеет вид:

$$T_H(v, s, t) = \left(\tau_{cm} + \frac{M}{E} \right) \cdot \left[\frac{\frac{\partial(\ln T)}{\partial(\ln v)} \cdot \frac{\partial(\ln M)}{\partial(\ln s)} - \frac{\partial(\ln T)}{\partial(\ln s)} \cdot \frac{\partial(\ln M)}{\partial(\ln v)}}{\frac{\partial(\ln M)}{\partial(\ln v)} - \frac{\partial(\ln M)}{\partial(\ln s)}} - 1 \right] \quad (21)$$

Исключая из системы (20), (21) t , находим уравнение $V(s)$, которое служит основой для нахождения алгоритма функционального преобразователя.

Если уравнение связи имеет вид:

$$C_M V^\alpha S^\beta L^\gamma = M_0 \quad (22)$$

а степенная зависимость аппроксимирована степенной функцией (II), то уравнение (21) принимает следующий вид:

$$T_H = \frac{C_T}{V^\alpha S^\beta L^\gamma} = \left(\tau_{cm} + \frac{M}{E} \right) \left(\frac{\alpha V - \beta M}{\alpha - \beta} - 1 \right) = const. \quad (23)$$

Заметим, что при $\alpha = 0$ выражение (23) совпадает с выражением (I2), а при $\beta = 0$ - с выражением (I3).

Из (22) и (23) находим функциональную зависимость $V(S)$:

$$V = C_v S^{\frac{\beta\rho - \gamma\delta}{\mu\delta - \alpha\rho}} = C_v S^{\epsilon}, \quad (24)$$

где C_v - некоторая постоянная.

Если используется стойкостная зависимость (14), то функциональная зависимость $V(S)$ принимает весьма сложный вид:

$$\exp\left[d - \frac{a}{k} V^k - \frac{b}{m} S^m - \frac{c(M_0)}{h(C_m)} \frac{1}{V} - \frac{\alpha h}{\delta} S^{-\frac{\alpha h}{\delta}}\right] \cdot \left(\frac{\beta S^m - \beta a V^k}{\alpha - \beta}\right) \cdot (25)$$

Несмотря на это, во многих случаях она может быть с достаточной для практики точностью аппроксимирована выражением (24). При этом уравнение функционального преобразователя 2 (см. рис. 3) принимает вид:

$$V = C_v^{\frac{1}{\epsilon+1}} \left(\frac{TD}{1000} S_m\right)^{\frac{\epsilon}{\epsilon+1}} \quad (26)$$

Разработка алгоритма оптимального управления процессом фрезерования узких пазов в высоколегированной стали. Ширина паза 3 мм, глубина - от 10 до 46 мм. Твердость обрабатываемого материала 22-26. Математическая обработка результатов экспериментального исследования¹⁾ на ЭВМ показала следующее. Наибольшую точность среди трех использованных аппроксимирующих стойкостных зависимостей дает экспоненциальная:

$$T = \exp(14,484 - 0,456V^{0,539} - 29,739S_z^{0,728} - 3,067t^{0,158}). \quad (27)$$

При $t > 15$ более жестким является ограничение по величине суммарного момента от сил резания на отдельных зубах фрезы, имеющее вид:

$$242,2V^{0,212} S_z^{1,368} t^{0,933} < 65 \text{ кгс}\cdot\text{м}. \quad (28)$$

Первое из условий (10) дает уравнение

$$0,246V^{0,539} = 21,65 S_z^{0,728},$$

которое соответствует линии - геометрическому месту точек M_0, M_5, \dots, M_{45} , являющихся точками минимума целевой функции (4). при

1) Исследование процесса проведено инж. Наууго А.Н. под руководством автора.

различных значениях t (рис.4). Индекс при обозначении точки обозначает глубину паза. Каждая из этих точек соответствует точке M на рис.1. На рис.4 нанесены (в логарифмических координатах) и линии ограничения, т.е. проекции следов плоскости "М" (рис.2) на секущих плоскостях t_i .

Из рис.4 следует, что при $t > 15$ линии ограничения не охватывают точек минимума целевой функции, т.е. этот минимум находится за пределами допустимой области. Пунктиром нанесена линия, соответствующая зависимости (25). Эта зависимость с помощью ЭВМ была аппроксимирована степенной функцией:

$$V = 32,375 S_z^{-0,073} \quad (29)$$

Погрешность аппроксимации в рабочей области не превышает 3%. Уравнение (29) соответствует прямой AB . Полный алгоритм оптимального управления рассматриваемым процессом изображается ломаной $M_{10}M_{15}B_{45}$. Ввиду незначительной разницы затрат на обработку в точках M_{10} и B_{10} можно и при $t < 15$ управление режимом осуществлять в соответствии с прямой AB . При этом подачу на зуб следует ограничить величиной, соответствующей точке B_{10} (0,044 мм/зуб). Это необходимо для предотвращения поломки отдельных зубьев при входе и выходе фрезы (когда более жесткое ограничение определяется нагрузкой на один зуб), а также для предотвращения разрыва диска фрезы из-за перегрузки по величине суммарного момента вследствие конечного быстрого действия реальной системы управления.

На основании (24), (26) и (29) можно найти уравнение функционального преобразователя $V = f(S_m)$ для управления скоростью резания. Однако в данном конкретном случае требуемый диапазон регулирования скорости резания весьма невелик ($\pm 3,75\%$). Поэтому связанное регулирование двух параметров режима в данном случае следует считать нецелесообразным, учитывая высокую стоимость контура регулирования скорости резания. Однако на основании рис.4 можно обоснованно назначать (с учетом конкретного профиля паза) среднее значение скорости резания, которое в данном случае должно несколько превышать 40 м/мин.

Разработка алгоритма оптимального управления процессом глубокого сверления имеет существенные особенности по сравнению с предыдущим. При сверлении $t = \frac{D}{2} = \text{const}$, но появляется еще одна переменная - L . Например, при исследовании процесса¹⁾ сверления

1) Исследование проведено В.И.Закачалдиным и Ю.П.Клепиковым под руководством автора.

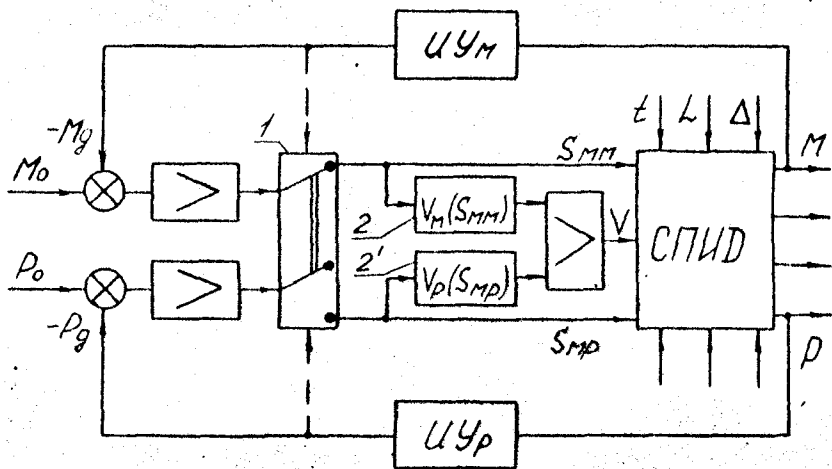


Рис. 3

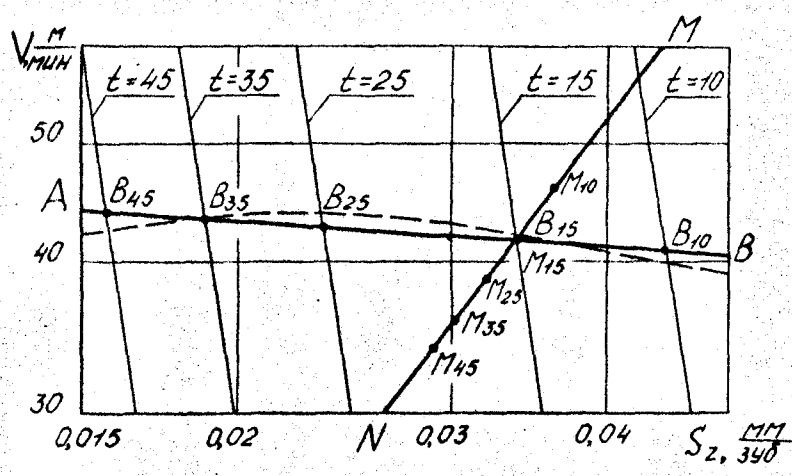


Рис. 4

отверстий диаметром $1,3^{+0,12}$ мм, глубиной 16 мм в деталях из сплава хромель (90% Ni и 9,5% Cr) получены следующие выражения для стойкостной зависимости и ограничений:

$$T = 7,24V^{-1,87} S^{-1,52} L^{-1,51} e^{-0,12}; \quad (30)$$

$$M = 2,812 \cdot 10^{-2} V^{0,033} S^{0,553} L^{0,831} e^{0,079} \leq 1 \cdot 10^{-2}; \quad (31)$$

$$P = 79,453V^{0,195} S^{0,706} L^{0,181} e^{0,178} \leq 21,9. \quad (32)$$

На рис.5 в соответствии с выражениями (31) и (32) построены плоскости ограничений M_0 и P_0 для первого прохода ($e=L$). По уравнению (23) построены две плоскости T_{HM} и T_{HP} , соответствующие оптимальным (в данном случае постоянным) значениям стойкости при стабилизации соответственно M и P . Линия CD пересечения плоскостей M_0 и T_{HM} графически изображает алгоритм управления процессом при стабилизации M , а линия EF пересечения плоскостей P_0 и T_{HP} изображает алгоритм управления при стабилизации P . Полный алгоритм оптимального управления изображается ломаной $EHKD$, отрезок которой HK лежит на линии пересечения плоскостей M_0 и P_0 . С целью упрощения алгоритма можно ограничить V и S значениями, соответствующими точке K ($S \approx 0,05$ мм/об; $V \approx 7,5$ м/мин).

При введении ограничений $V \leq 7,5$; $S \leq 0,05$ (необходимость которых определяется и реальным быстродействием системы управления) ограничение (32) становится избыточным, т.к. плоскость P_0 перестает участвовать в формировании границ допустимой области. Итак, на первом проходе оптимальное управление достигается стабилизацией крутящего момента на сверде за счет связанного регулирования подачи и скорости резания в соответствии с уравнением прямой $K'D'$; являющейся проекцией прямой KD .

На последующих проходах имеется уже два вида возмущений - L и e и связь между S и V теряет свою однозначность:

$$V = 9,572L^{-0,26} e^{0,055}; \quad (33)$$

$$S = 0,135L^{-0,675} e^{-0,146}. \quad (34)$$

Моделируя на ЭЦВМ процесс сверления, удалось получить аппроксимирующую зависимость:

$$V = 14,15 S^{0,262}, \quad (35)$$

которая с погрешностью, не превышающей 6,5%, определяет оптимальное значение скорости резания при любых практически возможных сочетаниях L и ℓ . На основании (26) и (35) находится уравнение функционального преобразователя 2 (рис.3):

$$V = 2,62 S_M^{0,21} \quad (36)$$

Однако на этом разработка алгоритма управления процессом глубокого сверления не заканчивается. Значения V и S определенные из (33) и (34), обеспечивают минимально возможный при данных L и ℓ уровень затрат, приходящихся на единицу длины обрабатываемого отверстия.

При увеличении L и ℓ минимально возможный уровень затрат увеличивается. Производя сверление отверстия заданной длины за несколько проходов, можно снизить затраты на обработку. Однако это снижение будет не беспредельным, т.к. при увеличении числа проходов увеличивается время, затрачиваемое на отводы и подводы сверла.

Задача оптимального разделения заданной длины отверстия на проходы сформулирована как задача минимизации функционала, выражающего затраты на обработку одного отверстия для случая, когда изменение V и S на каждом проходе определяется уравнениями (33) и (34):

$$C_{пк} = \sum_{i=1}^K \left[\tau_{mi} \left(E + \frac{E\tau_{cm} + I}{T_{им}} \right) + E\tau_{по} \right], \quad (37)$$

где K - число проходов (подлежит определению);

$\tau_{по}$ - среднее значение времени, затрачиваемого на подвод и отвод инструмента при каждом проходе.

Машиное время на i -том проходе (τ_{mi}) с учетом ограничений максимальных величин V и S определяется суммой:

$$\tau_{mi} = \frac{L_{ni} - L_{i-1}}{91,4} + \frac{1}{315,86} \int_{L_{ni}}^{L_i} L^{0,9335} (L - L_{i-1})^{0,0915} dL, \quad (38)$$

где L_{ni} - глубина, при которой на данном проходе вступает в работу система управления режимом, т.е. глубина, при которой требуется значение $S_M = 91,4$. Для каждого прохода имеет свое значение.

Таким образом, поставленная задача сведена к задаче оптимиза-

ним многошагового процесса с аддитивным критерием оптимальности. Для решения этой задачи использовался один из методов теории оптимального управления - метод динамического программирования Р.Беллмана. Результаты расчетов на ЭВМ "М-222"¹⁾ приведены на рис.6, из которого следует, что суммарное машинное время монотонно уменьшается с увеличением числа проходов. Оптимальным числом проходов является пять. При большем числе проходов уменьшение машинного времени уже не компенсирует дополнительных затрат времени на промежуточные выводы сверла. На рис.7 показано оптимальное разделение длины отверстия на проходы. Длина каждого прохода постепенно уменьшается (это характерно не только для оптимального числа проходов - такие данные получены для числа проходов от 2 до 12).

Наиболее простым вариантом практической реализации полученных результатов является путевое управление, т.к. оптимальное число проходов в данном случае невелико. Однако при отдельных реализациях процесса жесткое разделение длины отверстия на проходы, определенное на основе детерминированной модели процесса, может привести либо к поломке сверла при резком возрастании нагрузки в конце прохода, либо к перегреву сверла из-за большой продолжительности времени прохода.

Наибольшая ценность полученных результатов состоит в том, что по ним можно проследить общие закономерности изменения отдельных параметров - качественную картину процесса, на основании которой можно произвести обоснованный выбор варианта управления промежуточными выводами сверла. Для этого на рис.7 показаны значения V, S, nS в конце каждого прохода при их оптимальном числе. Здесь же нанесены величины машинного времени для каждого прохода. В данном конкретном случае наиболее ярким признаком является незначительное изменение машинного времени, что дает основание утверждать, что управление промежуточными выводами сверла наиболее целесообразно осуществлять с помощью реле времени, величина уставки которого должна составлять около 4,5 секунд.

При отдельных реализациях процесса характер возмущений может существенно отличаться от принятого в расчете. Например, возможен случай заклинивания сверла стружкой. Для предотвращения поломок сверл параллельно с реле времени необходимо включать и другие устройства, подающие команду на промежуточный вывод при уменьшении

1) Составление программы для ЭВМ проведено В.Ф.Штаном.

подачи до установленного нижнего предела или при определенном увеличении нагрузки сверх заданного значения.

Формирование алгоритма оптимального управления процессом внутреннего врезного шлифования. Особенностью шлифования является то, что наряду с ограничениями по величине нагрузки на инструмент (прямая KL на рис.8) в формировании границ допустимой области участвует ограничение по качеству обработанной поверхности. В координатах $Z - S_t$ (рис.8) это ограничение изображается кривой MN , ограничивающей зону бесприжогового шлифования. Аппроксимируя участок MK , граничной кривой отрезком прямой AK получаем предельный цикл шлифования LKA .

В тех случаях, когда оптимальная по затратам величина врезной подачи, найденная на основании (18) или (19), лежит ниже ограничения KL , оптимальным будет цикл FCA . При реализации этого алгоритма следует управлять не скоростью поперечных салазок в функции припуска, а скоростью действительного съема, т.е. скоростью изменения размера обрабатываемой поверхности. Между величинами названных скоростей при внутреннем шлифовании имеется существенное различие, обусловленное постепенным нарастанием упругих деформаций в технологической системе СПИД и размерным износом круга. Созданные в Куйбышевском политехническом институте системы управления с обратной связью по действительной скорости съема припуска (измерение которой в производственных условиях затруднено) наилучшие результаты обеспечивают при обработке дорожек качения колец шарикоподшипников шлифовальными кругами на вулканитовой связке, работающими с полным самозатачиванием. При обработке шлифовальными кругами на керамической связке корреляционная зависимость между скоростью съема и глубиной прижога значительно слабее, т.к. изменения режущей способности круга, вследствие затупления его зерен или засаливания оказывают существенное влияние на температуру в зоне шлифования и глубину прижога. В этих условиях нижняя граница доверительного интервала ограничения AK (рис.8) лежит достаточно низко. Поэтому при реализации системы управления с расчетом на наилучший вариант ее эффективность будет невысокой.

При управлении процессом шлифования кругами на керамической связке в качестве контролируемого следует принять тот параметр, который достаточно тесно связан с ограничениями, но в то же время может быть относительно просто измерен или задан в процессе обработки. Таким параметром является величина радиального усилия P_y между кругом и деталью.

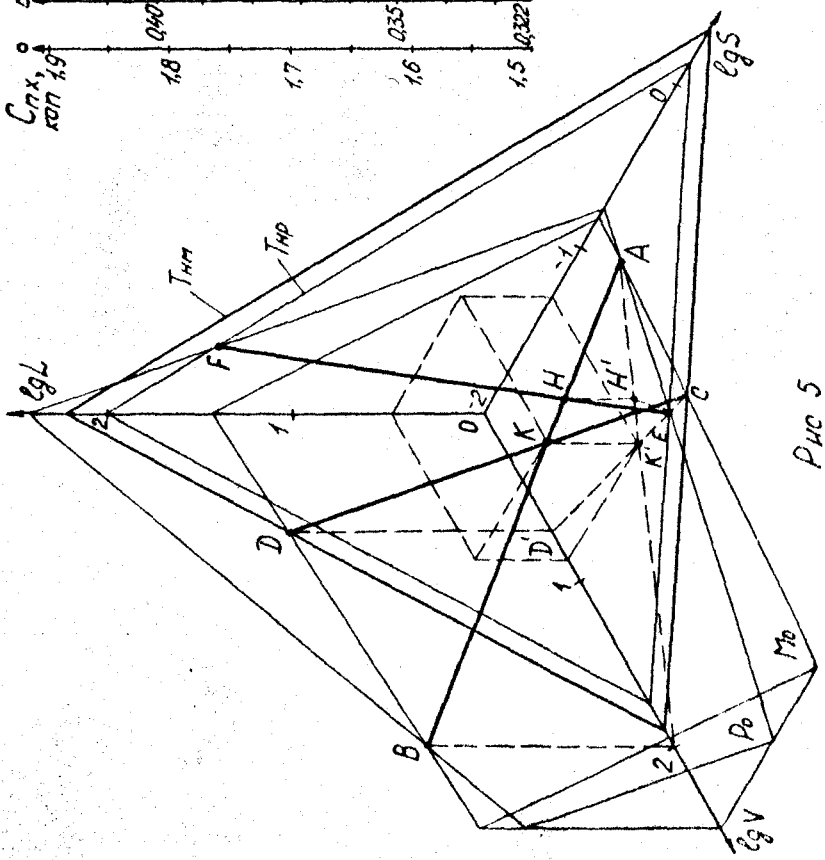


Рис. 5

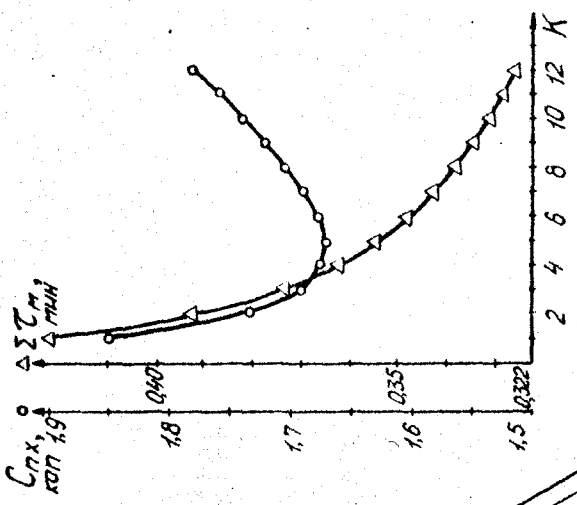


Рис. 6

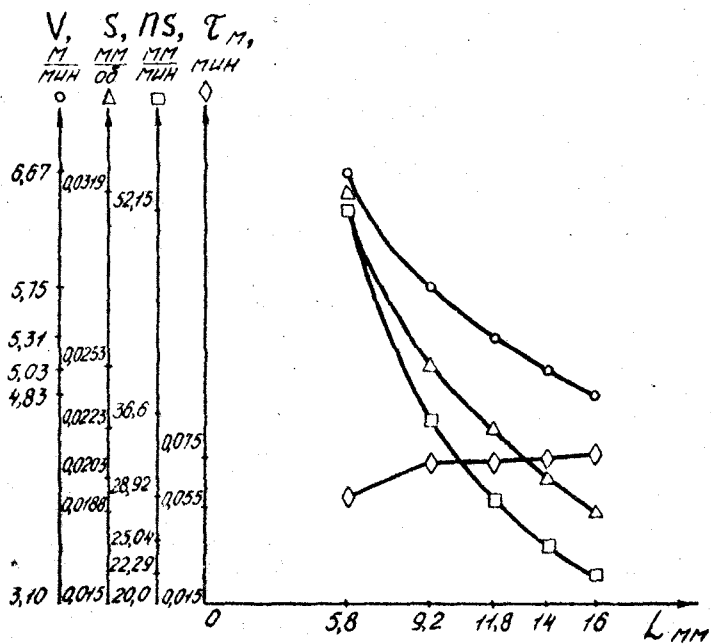


Рис. 7

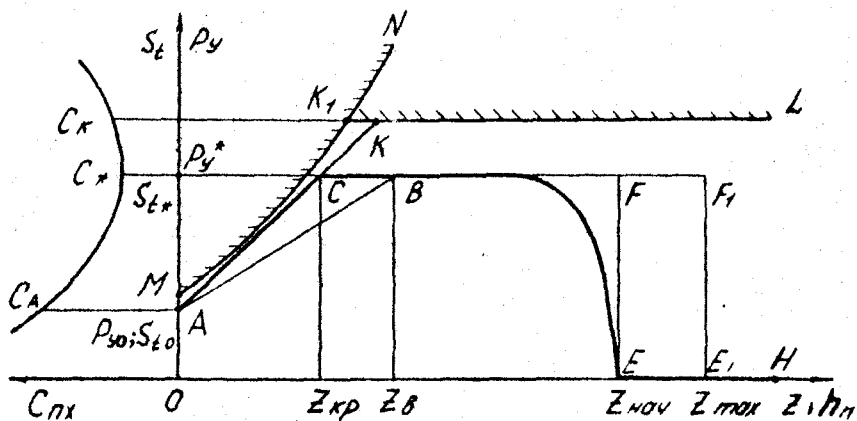


Рис. 8

При контроле за величиной P_y обработка различных заготовок будет заканчиваться при одном и том же значении этой силы P_{y0} , соответствующем точке A (рис.8). Это позволит значительно повысить точность формы обрабатываемого отверстия в осевом сечении, а также стабильность размера в тех случаях, когда автоматический цикл обработки осуществляется одним из существующих способов без непосредственного измерения обрабатываемой поверхности в процессе обработки.

Расчет параметров оптимального цикла для конкретной операции шлифования посадочного отверстия во внутреннем кольце подшипника 3520/02 с учетом производственных условий ГПЗ-6 (г.Свердловск) дал следующие результаты: $P_{y*} = 23$ кгс; $P_{y0} = 12,8$ кгс; $Z_{кр} = 0,02$ мм.

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ДИНАМИКИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ НАГРУЗКИ НА ИНСТРУМЕНТ¹⁾

Теоретический анализ и практика показывают, что наиболее сложно добиться удовлетворительного качества регулирования в рассматриваемых системах при периодических возмущениях, вызываемых радиальным биением инструмента (при фрезеровании пазов) или обрабатываемой поверхности (при внутреннем шлифовании).

В работе показано, что стабилизация величины суммарного момента на фрезе M_0 принципиально возможна в тех случаях, когда величина эксцентриситета ее зубьев относительно оси вращения не превышает некоторого критического значения, определяемого зависимостью:

$$E_{кр} = \frac{M_0}{K_3 \sin \eta \frac{\pi}{Z_n} \sum_{z=1}^{Z_k} \cos \left[\frac{\pi}{Z_n} (Z_k - 2z + 1) \right]}, \quad (39)$$

где K_3 - постоянный коэффициент, определяемый конкретными условиями обработки;

Z_k - число зубьев, одновременно находящихся в контакте с обрабатываемой деталью; $Z_k = f(\frac{t}{D})$.

Радиальное биение зубьев дисковых фрез при обычной обработке является причиной их крайне неравномерного износа и поломок. При обработке с регулированием подачи стабилизация суммарного момента в значительной мере выравнивает среднюю за один оборот фрезы нагрузку на ее отдельные зубья. Это является одним из существенных

¹⁾ Рассматривается динамика одномерных систем, в которых регулируемым параметром режима является только подача.

преимуществ обработки с регулируемой подачей. Практика в дальнейшем показала, что при регулируемой подаче обеспечивается спокойная обработка при такой величине биения фрезы, при которой обработка с постоянной подачей практически невозможна.

При врезном круглом шлифовании, в противоположность продольному и токарной обработке, можно, в принципе, создать такую систему, которая обеспечит постоянство радиального усилия при любой практически встречающейся величине эксцентricитета заготовки. Однако при этом произойдет копирование погрешностей заготовки и будет потеряно основное преимущество внутреннего шлифования — надежное исправление эксцентricитета обрабатываемой поверхности. Поэтому основным требованием к системе управления радиальным усилием является требование быстрейшего исправления эксцентricитета и погрешностей формы на первой стадии цикла при жестких ограничениях по силе и мощности шлифования. На заключительной стадии цикла система управления должна обеспечивать возможно более точную отработку "статического" алгоритма, показанного на рис.8.

При врезном шлифовании направление подачи совпадает с направлением радиальной силы, поэтому наиболее простым вариантом управления радиальным усилием является создание привода врезной подачи с определенными статическими и динамическими характеристиками. Для этого необходимо прежде всего значительно уменьшить силы трения в направляющих. В известных станках фирмы *Heald* это достигается применением гидростатических направляющих поперечных салазок. В данной работе была предложена упругая подвеска шлифовальной бабки. К динамическим характеристикам привода врезной подачи предъявляются жесткие, подчас противоречиво требования. В наибольшей степени, на наш взгляд, этим требованиям отвечает гидравлический привод с параллельно-последовательным дроссельным управлением.

Была составлена система уравнений, описывающая процесс врезного шлифования с указанным приводом подачи. После линеаризации, перехода к уравнениям в приращениях и исключения промежуточных переменных было получено следующее дифференциальное уравнение, выражающее взаимосвязь между величиной отклонения формы обрабатываемой поверхности от спирали Архимеда (установившийся процесс шлифования) на данном ($\delta y(\tau)$) и предыдущем ($\delta y(\tau - \tau_0)$) оборотах заготовки:

$$\begin{aligned} T_2^2(1+c\Gamma)\delta\ddot{y}(\tau) + T_1(1+c\Gamma)\delta\dot{y}(\tau) + \delta y(\tau) &= \quad (40) \\ &= T_2^2\delta\ddot{y}(\tau - \tau_0) + T_1\delta\dot{y}(\tau - \tau_0) + \delta y(\tau - \tau_0), \end{aligned}$$

где T_2^2 - отношение массы шлифовальной бабки к приведенной жесткости системы СПИД в радиальном направлении (c) ;
 $T_1 = \frac{d}{c}, d$ - параметр, характеризующий гидропривод подачи;
 P - параметр шлифования, равный отношению глубины шлифования к величине радиальной силы.

Полученное дифференциальное уравнение с запаздыванием аргумента может быть решено методом шагов с интервалом $\tau = \tau_0$. На первом интервале (на первом обороте заготовки) в правую часть (40) вместо $\delta y(\tau - \tau_0)$ следует подставить уравнение отклонения исходной поверхности, имеющее вид:

$$\delta y_0 = \varepsilon \cdot \sin(\omega \tau + \varphi), \quad (41)$$

где $0 < \tau < \tau_0$.

Общее решение уравнения (40) на первом интервале дает отклонение профиля обрабатываемой поверхности (от установившегося) после шлифования в течение времени τ_0 . Составляющая общего решения, соответствующая вынужденному движению, будет также синусоидой с той же круговой частотой, но измененными по сравнению с (41) амплитудой и фазой. Изменение амплитуды и фазы определяется соответственно модулем A и аргументом φ частотной характеристики, определяемой по уравнению (40), в котором в соответствии с принятым методом решения функция $\delta y(\tau - \tau_0)$ на каждом интервале считается известным входным воздействием, а функция $\delta y(\tau)$ - выходной величиной. Составляющие общего решения, соответствующие свободному движению системы (переходному процессу) пока не учитываем.

При решении уравнения (40) на втором интервале в его правую часть подставим полученное для первого интервала установившееся решение. Поступая и дальше аналогичным образом, получим отклонение профиля после k -го оборота:

$$\delta y_k = \varepsilon A^k \sin(\omega \tau + \varphi_0 + k\varphi), \quad (42)$$

где $k\tau_0 < \tau < (k+1)\tau_0$.

Изложенный метод представляет собой применение частотного метода для приближенного описания переходного процесса, вызываемого импульсным синусоидальным воздействием (41) на систему с запаздыванием аргумента.

Доказано, что предложенный метод дает удовлетворительную точность в том случае, если длительность переходного процесса при

решении уравнения (40) на каждом интервале не превышает $\frac{\tau_0}{4}$.

Главным достоинством предложенного метода¹⁾ является то, что на его основе можно получить зависимости, позволяющие в общем виде оценить влияние того или иного параметра системы на процесс исправления исходной погрешности заготовки. Результаты решения исходной системы уравнений на ЭЦВМ подтвердили приемлемость и высокую эффективность предложенного метода.

Другим способом упрощения анализа и синтеза систем рассматриваемого вида, описываемых дифференциальными уравнениями с запаздыванием аргумента и имеющих, следовательно, трансцендентные передаточные функции, является аппроксимация трансцендентной передаточной функции звена, формирующего толщину среза. Это звено можно представить последовательным соединением двух звеньев, первое из которых описывается уравнением:

$$S_{(z)}(\tau) = x(\tau) - x(\tau - \tau_0), \quad (43)$$

где x - величина относительного перемещения инструмента и детали в направлении рабочей подачи. Передаточная функция и частотная характеристика звена (43) соответственно равны:

$$W(p) = 1 - e^{-p\tau_0}; \quad (44)$$

$$W(j\omega) = 2 \left| \sin \frac{\omega\tau_0}{2} \right| \exp \left[j \omega \tau_0 \lg \left(\frac{\sin \omega\tau_0}{1 - \cos \omega\tau_0} \right) \right]. \quad (45)$$

Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) рассматриваемого звена представляет собой окружность единичного радиуса с центром в точке $(1, j0)$. При $\omega\tau_0 = 2\pi m$ (m - целое число) модуль частотной характеристики равен нулю, для этих частот рассматриваемое звено является идеальным фильтром. В рассматриваемых системах $\omega\tau_0 = 2\pi \frac{\kappa}{Z_n}$, где κ - отношение частоты входного сигнала ω к частоте вращения изделия или инструмента ω_n . При $Z_n = 1$ (токарная обработка, шлифование) и $\kappa \geq 1$ получить удовлетворительную аппроксимацию передаточной функции (44) весьма сложно, т.к. при этом $\omega\tau_0 \geq 2\pi$.

При рассматриваемых видах обработки лезвийным инструментом практически всегда $\omega\tau_0 \leq 2\pi$. Этому способствуют, в частности, хорошие демпфирующие свойства широко применяемого гидравлического привода подачи. При этих условиях наиболее точная аппроксимация исходной

1) Разработан совместно с Д.В.Калеником.

передаточной функции (44) может быть получена разложением экспоненты в дробно-рациональный ряд Паде.¹⁾ В работе получена следующая аппроксимация выражения (44):

$$W(\rho) = \frac{\tau_0 \rho}{1 + \frac{\tau_0}{2} \rho + \frac{\tau_0^2}{12} \rho^2}, \quad (46)$$

которая соответствует замене исходного звена последовательным соединением дифференцирующего и колебательного звеньев. АФЧХ аппроксимирующего звена при $\omega \tau_0 \leq T$ практически совпадает с исходной, при дальнейшем возрастании $\omega \tau_0$ ошибки по фазе и амплитуде постепенно становятся весьма большими.

При анализе вынужденного движения может ставиться задача аппроксимации исходной передаточной функции при вполне определенном значении $\omega \tau_0$. В этих случаях в знаменателе аппроксимирующего выражения (46) число 12 следует заменить на 2α . Значение α определяется для каждого заданного значения $\omega \tau_0$. Например, при $\alpha = 3,31$ получаем абсолютно точную аппроксимацию для одного значения $\omega \tau_0 = 1,5T$ и удовлетворительную аппроксимацию в достаточно широком диапазоне - от 0 до $1,6T$.

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ОБРАБОТКИ, ВЫПОЛНЯЕМЫМИ ИНСТРУМЕНТОМ МАЛОЙ ПРОЧНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ

Изложенные выше результаты теоретических исследований явились основой создания многочисленных систем автоматического управления (САУ), в результате испытаний и конструктивной доработки которых удалось создать достаточно простые и надежные системы и внедрить их в производство. Ниже дается краткая характеристика внедренных систем управления.

1) Одной из таких систем является САУ к трехшпиндельному станку для глубокого сверления модели ХА 3433 [8]. Измерение крутящего момента на каждом из трех одновременно работающих сверл осуществляется с помощью индивидуального приводного балансирующего динамометра. Особенностью этой системы является наличие устройства, осуществляющего непрерывное сравнение сигналов с трех динамометров и подключающего к тракту управления подачей динамометр наиболее нагруженного в данный момент времени шпинделя. Наряду с реле времени имеет-

1) Титов Н.И., Успенский В.К. Моделирование систем с запаздыванием. Л., "Энергия", 1969.

ся устройство, подающее сигнал на промежуточный вывод сверл при уменьшении подачи до установленного нижнего предела. Эта система внедрена в 1967 году на ЧТЗ на операции сверления топливopодводящего отверстия в корпусе форсунки. Диаметр отверстия 2 мм, длина 59 мм. В результате внедрения системы производительность обработки увеличилась в 2 раза, расход сверл уменьшился в 2 раза, а брак - почти в шесть раз, годовой экономический эффект составил 4340 рублей.

2) Для автоматизации операции сверления трех наклонных отверстий диаметром $1,5^{+0,3}$ мм и глубиной 24 мм в корпусе распылителя была разработана не только новая, более совершенная по сравнению с предыдущей система управления, но и оригинальная конструкция настольного агрегатно-сверлильного станка. Основную сложность при создании САУ представляла разработка малоинерционного и надежного устройства для измерения момента на сверле. Величина этого момента составляет около 1,5 кгс.см. Наилучшие результаты были получены при применении редукторного динамометра, выполненного по планетарной схеме с зубчатыми колесами наружного зацепления. Этот динамометр обладает не только высокой разрезающей способностью, но и большой мощностью выходного сигнала, что позволило создать простую и надежную систему прямого регулирования (без промежуточных усилителей). Оригинальная гидравлическая схема станка исключает влияние нагрева масла в гидроприводе на стабильность настройки САУ и повышает ее быстродействие [30]. Станок имеет автоматическое поворотное трехпозиционное приспособление, обеспечивающее автоматизацию полного цикла обработки детали. Если количество промежуточных выводов сверла при обработке одного отверстия превысит установленное, что свидетельствует о неправильной заточке или критическом затуплении сверла, специальное счетное устройство останавливает станок и подает световой сигнал на смену инструмента. В лаборатории кафедры было изготовлено 8 таких станков, которые были внедрены в производство на ЧТЗ. Внедрение этих станков позволило увеличить производительность труда на операции в 3 раза, т.к. до этого обработка велась на настольно-сверлильных станках с ручной подачей, значительно (в 2,5 раза) уменьшить брак и расход сверл. Годовой экономический эффект составил 40.000 рублей.

3) Для автоматизации рассмотренной ранее операции сверления глубоких отверстий диаметром $1,3^{+0,12}$ (глубина 16-18 мм) в деталях из сплава хромель были созданы усовершенствованные станки с САУ, в которых, в частности, применены более чувствительные редукторные

динамометри: Два таких станка внедрены в производство. До их внедрения рассматриваемая операция выполнялась на токарных станках с ручной подачей. Деталь сверлилась с двух сторон, несопадение осей устранялось дополнительной операцией рассверливания. Внедрение автоматизированных станков позволило повысить производительность труда в 3 раза и получить экономический эффект в 23.000 руб.

В настоящее время разработан проект станка для сверления аналогичных отверстий в деталях из сплава алюминий.

4) Для рассмотренной выше операции фрезерования узких пазов первоначально была создана система управления с контролем величины крутящего момента на фрезе [29]. Измерение крутящего момента осуществляется также планетарным редукторным динамометром [27], закрепляемым на переднем конце шпинделя станка. Механический привод подачи базового станка заменен пневмогидравлическим, управление скоростью которого ведется в зависимости от величины момента на фрезе. Система внедрена в производство на Златоустовском машиностроительном заводе им.Ленина. В дальнейшем была создана более простая система управления, стабилизирующая горизонтальную составляющую силы резания [17]. Несмотря на более низкую точность, эта система в производственных условиях оказалась более эффективной благодаря весьма высокой надежности. Эта система внедрена на девяти станках. Результаты внедрения: повышение производительности обработки - в 1,5 раза, уменьшение расхода инструмента - на 40%, годовой экономический эффект - 15.000 руб.

На этом заводе внедрена в производство гидравлическая система автоматического регулирования подачи [2] для специальных расточных полуавтоматов, выполняющих операции растачивания глубоких отверстий. В результате ее внедрения производительность обработки возросла в 1,5 раза, получен годовой экономический эффект около 29.000 руб.

5) САУ процессом внутреннего врезного шлифования [16] прошла длительные и всесторонние испытания на ГПЗ-6 (г.Свердловск). В настоящее время внедрена на Челябинском заводе тракторных агрегатов на операции шлифования посадочных отверстий диаметром 85А и 95А в шестернях коробки перемены передач. Благодаря высокой стабильности радиального усилия, обеспечиваемой в конце цикла шлифования, удалось осуществить автоматический цикл обработки отверстий второго класса точности без непосредственного контроля размера в процессе обработки. Косвенный контроль размера осуществляется более простым способом - по положению шлифовальной бабки, закрепленной на кресто-

вом пружинном шарнире. Система управления обеспечивает изменение радиального усилия по найденному алгоритму (см. рис. 8) и промежуточную правку шлифовального круга перед чистовым шлифованием за счет компенсирующего перемещения поперечных салазок. При этом обеспечивается высокая точность формы отверстия (0,02 мм) и надежное исправление его эксцентриситета относительно начальной окружности зубчатого венца. Технико-экономические результаты внедрения: повышение точности обработки на один класс, повышение производительности обработки в 1,5 раза, годовой экономический эффект - 40.000 рублей.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Задача оптимизации процесса обработки на отдельной операции должна формулироваться на основе более общей задачи оптимизации технологического процесса изготовления детали. После установления обоснованных требований к качеству обработки на отдельной операции математическим выражением критерия ее оптимальности следует принять функционал, выражающий средние за период стойкости инструмента приведенные хозяйственные затраты предприятия, приходящиеся на единицу объема удаленного при обработке материала или на единицу площади обработанной поверхности.

2. На основе принципа максимума Понтрягина доказано, что при оптимальном управлении процессом обработки необходимо определенным образом изменять подачу и скорость резания не только в зависимости от глубины резания (при обработке с заданным числом проходов), глубины сверления и других переменных параметров обработки, но и в зависимости от величины износа инструмента.

Случай, при котором оптимальные значения параметров режима не зависят от величины износа инструмента, а критерий оптимальности может быть математически выражен в виде целевой функции, являющейся частным, но достаточно распространенным.

3. Характер изменения затрат на обработку при изменении параметров режима определяется закономерностями износа инструмента. Найдены необходимые условия, позволяющие на основе аналитического или графического описания стойкостной зависимости для используемого инструмента определить точки или области параметров режима, в которых целевая функция может иметь внутренний минимум. В этих областях аппроксимация экспериментально получаемых стойкостных зависимостей аналитическими функциями должна производиться особенно строго.

4. Найдены уравнения для нахождения сочетаний параметров режима, доставляющих внутренний минимум целевой функции при некоторых видах стойкостных зависимостей для лезвийного инструмента, а также уравнения для определения оптимальной интенсивности съема припуска при различных условиях работы шлифовального круга.

5. Обработка при оптимальном сочетании параметров режима в общем случае не характеризуется фиксированными или экстремальными значениями физических параметров процесса, что затрудняет создание систем оптимального управления.

6. Задача нахождения алгоритма оптимального управления при ограничениях, характерных для процессов обработки лезвийными инструментами малой прочности, может быть сведена к нахождению условного экстремума целевой функции при связях между параметрами режима, выражаемых силовыми зависимостями процесса обработки. Это вытекает из того факта, что для рассматриваемых процессов оптимальный режим всегда соответствует границе допустимой области.

7. Близкое к оптимальному управление процессами обработки лезвийными инструментами малой прочности достигается применением относительно простых систем с отрицательными обратными связями по силовым параметрам процесса. В общем случае такие системы должны состоять из двух автоматически переключаемых замкнутых контуров, в каждом из которых предусмотрено связанное регулирование подачи и скорости резания. Управление скоростью резания осуществляется в зависимости от минутной подачи по алгоритму, определяемому на основе детерминированной математической модели процесса. Наличие отрицательной обратной связи в значительной степени устраняет недостатки системы, связанные с использованием при ее построении детерминированной модели процесса.

Найдено общее выражение алгоритма функционирования предложенной системы и его частные выражения для различных видов стойкостной зависимости.

8. На основе экспериментально полученных силовых и стойкостных зависимостей построена математическая модель процесса и найден алгоритм его оптимизации для конкретной операции фрезерования узких пазов.

9. На основе метода динамического программирования Р.Беллмана разработана методика определения алгоритма оптимального управления промежуточными выводами сверла при глубоком сверлении.

Для конкретной операции глубокого сверления найден полный алгоритм автоматического оптимального управления процессом.

10. При внутреннем шлифовании для реализации найденного алгоритма управления процессом необходимо осуществлять контроль за его ходом либо по величине действительной скорости съема припуска, либо по величине радиального усилия. Последний способ предпочтительнее, т.к. в этом случае корреляционная связь контролируемого параметра с параметрами качества поверхности более тесная.

11. В рассматриваемых системах наиболее сложно добиться удовлетворительного качества управления при периодических возмущениях, вызываемых радиальным биением инструмента или обрабатываемой поверхности. Показано, что при фрезеровании стабилизировать крутящий момент на фрезе за счет регулирования подачи можно только в том случае, если величина эксцентриситета ее зубьев не превышает определенного значения, зависящего от глубины фрезерования, заданной величины крутящего момента и динамических качеств системы регулирования.

12. Для приближенного описания переходного процесса, вызванного импульсным синусоидальным воздействием (например, исходным эксцентриситетом обрабатываемой поверхности при врезном внутреннем шлифовании), в рассматриваемых динамических системах с запаздыванием аргумента может быть использован частотный метод, обычно применяемый для описания установившегося движения линеаризованных систем. Это значительно упрощает синтез систем управления для внутришлифовальных станков и выбор параметров их настройки. Обоснованы границы применимости частотного метода.

13. Передаточная функция звена, формирующего толщину среза, трансцендентная. Это приводит к трансцендентности передаточных функций рассматриваемых систем управления и затрудняет их анализ и синтез. В частных случаях, рассмотренных в работе, возможна аппроксимация этой передаточной функции более простым выражением, получаемым путем разложения экспоненциальной функции в дробно-рациональный ряд Паде.

14. На основе теоретических разработок были созданы системы автоматического управления процессами обработки, осуществляемыми с использованием инструмента малой прочности и жесткости. Многие из этих систем внедрены в производство, в результате чего был получен значительный экономический эффект.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ АВТОРА:

1. Увеличение производительности при глубоком сверлении отверстий малого диаметра путем автоматического регулирования. Сб. "Самоподнастраивающиеся станки", М., "Машиностроение", 1967. (А.Д.Шереметьев, В.А.Полетаев).¹⁾
2. Вопросы расчета и проектирования систем автоматического регулирования подачи при токарной обработке. Сб. "Самоподнастраивающиеся станки", М., "Машиностроение", 1967.
3. Сверление глубоких отверстий малого диаметра при автоматической стабилизации нагрузки на сверло. Тезисы докладов межвузовской конференции "Повышение точности и производительности обработки путем управления упругими перемещениями станка". М., Мобстанки, 1967. (А.Д.Шереметьев, В.А.Полетаев).
4. Автоматическое регулирование подачи при токарной обработке и сверлении глубоких отверстий малого диаметра. Сб. "Доклады конференции научных работников, посвященной 50-летию Советской власти", Челябинск, Областное правление НТО МАШПРОМ, 1967.
5. Автоматическая стабилизация крутящего момента при сверлении глубоких отверстий малого диаметра. "Станки и инструмент", 1968, №8 (В.А.Полетаев).
6. Электрогидравлическая система стабилизации момента при сверлении глубоких отверстий малого диаметра. ГОСИНТИ, ОМТ, серия Ш, №46/12-69, 1969. (В.А.Полетаев).
7. Автоматическое регулирование режимов при механической обработке. Сб. трудов ЧПИ "Технология чистовой и отделочной обработки поверхностей деталей". Челябинск, 1969, №47.
8. Стабилизация нагрузки на сверле в процессе глубокого сверления при многоинструментальной обработке. Сб. "Самоподнастраивающиеся станки", М., "Машиностроение", 1970.
9. Формообразование поверхности при врезном внутреннем шлифовании с контролем усилия врезания. Сб. трудов ЧПИ "Прогрессивная технология чистовой обработки деталей машин", Челябинск, 1970, №79 (Д.В.Каленик).
10. Исследование технологических возможностей агрегатного станка, оснащенного системой автоматического регулирования. Сб. трудов Кузбасского политехнического института "Вопросы технологии машиностроения", Кемерово, 1970, №31. (В.А.Полетаев).

1) Здесь и далее в скобках указаны соавторы.

11. Агрегатный станок с автоматическим регулированием подачи в процессе сверления глубоких отверстий малого диаметра. Сб. "Повышение производительности экономичности и качества обработки деталей на металлорежущих станках". Ижевск, 1971. (В.И.Закамалдин).
12. Автоматическая оптимизация режима в процессе обработки на металлорежущих станках. Сб. трудов Тульского политехнического института "Технологии машиностроения", Тула, 1971, вып.23.
13. Автоматизированный агрегатный станок для сверления глубоких отверстий малого диаметра с адаптивной системой автоматического управления. Сб. "Адаптивные системы управления металлорежущими станками", М., НИИМАШ, 1971 (В.И.Закамалдин).
14. Повышение точности размера и формы поверхности при внутреннем шлифовании с контролем усилия врезания. Сб. "Адаптивные системы управления металлорежущими станками", М., НИИМАШ, 1971 (Д.В.Каленик).
15. Станок для глубокого сверления отверстий малого диаметра со стабилизацией крутящего момента. "Станки и инструмент", 1972, №1 (В.И.Закамалдин).
16. Динамика процесса внутреннего врезного шлифования с регулируемой радиальной составляющей силы резания. "Вестник машиностроения", 1972, №8 (Д.В.Каленик).
17. Фрезерование узких и глубоких пазов на станках с автоматическим регулированием подачи. "Вестник машиностроения", 1972, №11 (А.Н.Нагуло).
18. Построение математических моделей и исследование динамики адаптивных систем управления процессом обработки лезвийным инструментом. Тезисы докладов к научно-техническому совещанию "Повышение производительности металлорежущих станков и точности обработки путем применения адаптивных систем", ДДНТП, Ленинград, 1973 (В.Ф.Штакан).
19. Разработка алгоритма и системы управления процессом внутреннего врезного шлифования. Там же (Д.В.Каленик).
20. Управление процессами обработки в условиях низкой жесткости технологической системы и малой прочности инструмента. Там же.
21. Анализ процесса исправления погрешностей формы при врезном внутреннем шлифовании с регулируемым радиальным усилием. "Известия ВУЗов. Машиностроение", 1973, №8 (Д.В.Каленик).

22. К вопросу аппроксимации силовых и стойкостных зависимостей при механической обработке. Сб. научных трудов ЧПИ "Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки", Челябинск, 1974, №145 (В.Ф.Штакан).
23. Влияние параметров гидропривода и режима обработки на процесс исправления исходной погрешности при внутреннем шлифовании с регулируемым радиальным усилием. Там же (Д.В.Каленик).
24. Оптимизация режима обработки при фрезеровании узких и глубоких пазов. Там же (А.Н.Нагуло).
25. Автоматическая оптимизация режима резания при обработке инструментом малой прочности. "Станки и инструмент", 1974, №10.
26. Привод агрегатной головки для глубокого сверления. Авторское свидетельство на изобретение №224260. Бюллетень изобретений, №25, 1968 (В.А.Полетаев).
27. Устройство для сборки резьбовых соединений. Авторское свидетельство на изобретение №289896. Бюллетень изобретений, №2, 1971 (А.И.Карасев).
28. Гидравлический регулятор подачи металлорежущих станков. Авторское свидетельство на изобретение №359435. Бюллетень изобретений, №35, 1972 (И.М.Рыбкин, В.П.Еляпин, Ю.И.Малкин).
29. Станок для фрезерования пазов. Авторское свидетельство на изобретение №402434. Бюллетень изобретений, №42, 1973 (Ю.П.Клепиков, А.Н.Нагуло).
30. Сверлильная головка с автоматическим регулированием подачи. Авторское свидетельство на изобретение по заявке №1966463/25-8. Решение от 14.В.74 (В.И.Закамадди, Ю.П.Клепиков, Л.И.Мохаилов).