

621.9 (043)

Ш 872

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

Челябинский политехнический институт  
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

ШТАКАН Виктор Федорович

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ОБРАБОТКИ  
ДЕТАЛЕЙ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ПОДАЧИ

Специальность 05.02.08 - "Технология машиностроения"

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

Челябинск-1978

Работа выполнена на кафедре автоматизации механосборочного производства (АМСП) Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор техн. наук, профессор Тверской М.М.

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, профессор, лауреат Ленинской премии Бааров Б.М. (г.Москва),  
кандидат техн. наук, доцент Кошин А.А. (г.Челябинск).

Ведущее предприятие - тракторостроительное объединение "Челябинский тракторный завод имени В.И. Ленина".

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1978г.

Защита состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1978г., в 15 часов в аудитории 244 на заседании специализированного совета К-597/1 по присуждению ученой степени кандидата технических наук в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола (454044, Челябинск, проспект имени В.И.Ленина, 76).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
кандидат технических наук, доцент  Меньшаков В.М.



### Актуальность работы

Дальнейшее повышение производительности труда и качества изделий машиностроения, предусмотренные решениями XXV съезда КПСС, обеспечиваются мероприятиями по комплексной механизации и автоматизации производства. При этом диалектика научно-технического прогресса уже сегодня требует осуществления автоматизации на уровне оптимального управления технологическими процессами. Решение таких задач позволяет достигнуть наилучших технико-экономических показателей.

Разработка технологических основ оптимального управления режимом обработки на металлорежущих станках представляется одной из научных проблем технологии машиностроения.

Задачи, включаемые в эту проблему, можно разделить на два основных класса. Первый класс задач предусматривает разработку критерия оптимальности и построение алгоритмов, в соответствии с которыми должны быть спроектированы системы автоматического управления технологическими параметрами обработки. При решении этих задач, как правило, не учитываются динамические свойства реальных систем управления.

Второй класс задач предусматривает исследование динамики технологических процессов обработки при автоматическом управлении режимом с целью выработки требований к динамическим показателям систем управления и рекомендаций по их построению.

За последнее десятилетие появились работы в области решения задач первого класса. Это работы Ю.М.Соломенцева, М.М.Тверского, Б.М.Базрова, А.О.Этин и других авторов. Решению же задач второго класса до сего времени уделяется явно недостаточное внимание. Об этом можно судить по весьма небольшому количеству опубликованных работ. Решение указанных задач должно выявить резервы дальнейшего повышения эффективности управления режимом обработки на станках и является в настоящее время актуальным.

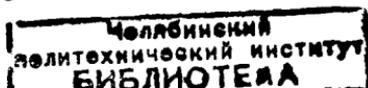
### Цель работы

Целью работы является решение задач, направленных на обеспечение качества управления технологическими процессами обработки деталей на станках с целью дальнейшего повышения эффективности этих процессов.

### Основные задачи

Основными задачами, решаемыми в работе являются следующие:

1. Регламентация условий выполнения технологических операций ме-



ханообработки при автоматическом регулировании подачи.

2. Разработка методики исследования автоматических регуляторов подачи, выполненных на базе дифференциальных зубчатых механизмов с учетом технологических погрешностей их изготовления, и выработка на основе этих исследований рекомендаций по проектированию таких регуляторов.

3. Исследование динамики замкнутых систем регулирования подачи с целью определения значений их параметров, обеспечивающих требуемое качество процесса обработки.

4. Исследование возможности упрощения математических моделей изучаемых систем с целью построения инженерной методики их расчета и исследования.

### Научная новизна

1. На основе изучения особенностей динамики технологических процессов обработки на станках с регулированием подачи обоснована методика построения моделей и исследование этих процессов.

2. Впервые поставлена и решена задача исследования регуляторов подачи, выполненных на базе дифференциальных механизмов, в условиях кинематических возмущений, вызванных погрешностями изготовления зубчатых колес, и построена математическая модель этих регуляторов.

3. Разработан метод аппроксимации математических моделей рассматриваемых систем управления подачей, описываемых дифференциальными уравнениями с запаздывающим аргументом, который позволил построить инженерный метод исследования реальных систем на упрощенных моделях.

### Практическая ценность и реализация работы

1. Регламентированы условия выполнения технологической операции фрезерования пазов при автоматическом регулировании подачи и определены критические значения суммарного эксцентриситета инструмента.

2. Разработанный метод расчета регуляторов подачи позволяет оценить их влияние на технологический процесс обработки и на этапе проектирования рационально скорректировать параметры регуляторов.

3. Предложенный метод исследования технологической операции сверления глубоких отверстий малого диаметра при автоматическом регулировании подачи позволяет на этапе проектирования оценить ожидаемое качество регулирования режима с целью точного воспроизведения алгоритма управления и обеспечения требуемого качества обработки.

4. Построенная математическая модель позволяет исследовать устойчивость технологической операции цилиндрического фрезерования с автоматически регулируемой подачей с учетом динамической характерис-

тики процесса резания.

Результаты, полученные в работе, были использованы при проектировании систем регулирования подачи для сверления глубоких отверстий малого диаметра и фрезерования узких пазов, что подтверждено тремя актами внедрения. Системы внедрены на одном из Казанских заводов, Златоустовском машиностроительном заводе имени В.И.Ленина и Свердловском заводе "Пневмостроймашина".

#### Апробация работы

Результаты проведенных исследований по теме диссертации докладывались автором:

1. На региональной конференции по использованию вычислительной техники в инженерных расчетах, Челябинск, 1972.
2. На всесоюзном научно-техническом совещании "Повышение производительности металлорежущих станков и точности путем применения адаптивных систем", Ленинград, 1973.
3. На научно-технических конференциях в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола в 1972-1978 гг.
4. На всесоюзной конференции "Оптимизация технологических процессов механической обработки деталей и сборки приборов", Киев, 1978.

#### Публикация

Основное содержание диссертации отражено в 10 печатных работах автора.

#### Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации: 142 страницы текста, 46 иллюстраций и 5 приложений (в том числе 3 акта внедрения). Список литературы содержит 128 наименований. Общий объем работы составляет 213 страниц.

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СТАНОК-ПРИСПОСОБЛЕНИЕ-ИНСТРУМЕНТ-ДЕТАЛЬ(СПИД) КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

В изучаемых субоптимальных системах в соответствии с разработанным д.т.н. Тверским М.М. алгоритмом управления в процессе обработки стабилизируются соответственно момент нагрузки на сверло  $M_n$  и на фрезу  $M_f$ .

Для осуществления на практике разработанного алгоритма управления необходимо, чтобы система СПИД была охвачена отрицательной обратной связью по суммарному моменту нагрузки на инструмент. Среди причин, вызывающих отклонение данного силового параметра от номинального

значения могут быть изменения: свойства обрабатываемого материала, степени затупления инструмента, глубины фрезеруемого паза, текущей глубины сверления и другие.

Основными звеньями замкнутой системы регулирования режима являются система СПИД и регулятор подачи. В соответствии с исследованиями В.А.Кудинова, система СПИД представляется замкнутой динамической системой, в которой протекают взаимосвязанные процессы резания, процессы трения, процессы в приводах и процессы упругих деформаций.

Указанные подсистемы связаны внутренними связями. Введение автоматического регулятора подачи соответствует появлению внешней отрицательной обратной связи. В исследуемых в диссертации случаях обработки эта дополнительная связь осуществляется по моменту нагрузки на сверле  $M_n$  и на фрезе  $M_f$  соответственно.

Одним из наиболее важных является собственно процесс резания, так как система управления режимом обработки использует информацию о силовых параметрах этого процесса. Поэтому при исследовании динамики процессов обработки с автоматическим регулированием подачи необходимо построить математическую модель однозначной связи между их силовыми и технологическими параметрами. На основании экспериментов, проведенных на кафедре АМСП Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола, при обработке отверстий 1,3 мм в материале хромель марки НХ 9,5 ГОСТ 492-52 получено следующее квазистатическое соотношение

$$M_n = 2,812 \cdot V^{0,033} \cdot S^{0,553} \cdot L^{0,381} \cdot \Delta L^{0,079} \text{ кгс-см.} \quad (1)$$

Учитывая модель формирования толщины срезаемого слоя и динамику процесса резания, характеризующуюся постоянной времени, получаем дифференциальное уравнение, связывающее момент нагрузки с технологическими параметрами обработки

$$\frac{dM_n}{dt} = 2 \sin \varphi_0 \left\{ x(\tau) - x\left(\tau - \frac{\tau_0}{2}\right) \right\} \cdot \frac{M_n}{\text{EXP}\{1,81[\ln M_n - 0,033 \cdot \ln(\tau_0 \omega_s \cdot 0,6) - 0,381 \cdot \ln(x_{cr}) \cdot 0,1] - 0,079 \cdot \ln(\Delta L \cdot 0,1)] \cdot \frac{1}{T_m} - \frac{M_n}{T_m}} \quad (2)$$

где  $\tau_0$  - время одного оборота сверла;

$\Delta L$  - текущее значение величины заглубления инструмента на данном проходе при многопроходной обработке.

Полученное уравнение входит в замкнутую математическую модель процесса сверления глубоких отверстий малого диаметра.

Процесс фрезерования (в работе рассматривается случай встречного фрезерования паза прямозубой цилиндрической фрезой) более сложен в моделировании из-за дискретного характера этого вида обработки. Для

автоматического учета нахождения того или иного зуба фрезы в зоне контакта с деталью в рассмотрение вводится кусочно-непрерывная линейная функция  $f(\varphi_i)$ . Из представления этой функции следует

$$\begin{cases} f(\varphi_i) = 1 & | & 2\pi k \leq \varphi_i \leq \theta_i + 2\pi k \\ f(\varphi_i) = 0 & | & \theta_i + 2\pi k < \varphi_i < 2\pi(k+1), \quad k=1,2,3,\dots,n. \end{cases} \quad (3)$$

Основными силовыми параметрами процесса фрезерования являются момент нагрузки  $M_\phi$  и суммарная сила подачи  $F_x$ . С учетом постоянной времени  $T_p$  процесса резания и особенностей формирования толщины срезаемого слоя каждым зубом фрезы получаем дифференциальное уравнение для изменения момента нагрузки

$$T_p \omega_\phi \frac{dM_\phi}{d\varphi} + M_\phi = H_\phi \cdot k_p \{x(\varphi) - x(\varphi - \psi)\} \cdot \Phi_1, \quad (4)$$

где  $\Phi_1 = \sum f(\varphi_i) \sin[\varphi + (i-1)\psi]$ ,  
 $\varphi$  - угол поворота фрезы;  
 $\psi$  - угловой шаг фрезы.

Коэффициент пропорциональности  $k_p$  вычисляется на основе данных экспериментальных исследований А.Н. Нагуло, в результате которого получено выражение

$$M_\phi = 41,5 V^{0,212} \cdot S_x^{0,860} \cdot t^{0,933} \quad (5)$$

Аналогичным образом получаем дифференциальное уравнение для изменения суммарной силы подачи

$$T_p \frac{dF_x}{d\varphi} + F_x = k_x \cdot k_p \{x(\varphi) - x(\varphi - \psi)\} \cdot \Phi_2, \quad (6)$$

где  $\Phi_2 = \sum f(\varphi_i) \sin[\varphi + (i-1)\psi + \gamma] \cdot \sin(\varphi_i + \frac{\psi}{2})$ .

Функции  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  периодические с периодом, равным угловому шагу фрезы  $\psi$ . Однозначная связь между силовыми и технологическими параметрами описывается дифференциальными уравнениями с запаздывающим аргументом. Кроме того в случае фрезерования эта связь описывается дифференциальными уравнениями с запаздывающим аргументом и периодическими коэффициентами.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ПОДАЧИ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Регуляторы подачи являются одним из наиболее важных звеньев автоматизированного процесса механообработки, так как они предназначены для реализации алгоритма управления режимом. В исследуемых системах применяются регуляторы, выполненные на основе дифференциальных

динамометрических механизмов (см. Рис. Ia и Ib). Кинематический анализ регуляторов в условиях параметрического возмущения, обусловленного наличием кинематического эксцентриситета эпицикла, позволяет найти связь между угловыми частотами шпинделя  $\tilde{\omega}_3$ , водила  $\tilde{\omega}_6$  и эпицикла  $\tilde{\omega}_1$ .

$$\tilde{\omega}_3 = \tilde{\omega}_6 (1 - i_{32} \cdot i_{21}^*) + \tilde{\omega}_1 \cdot i_{32} \cdot i_{21}^* \quad (7)$$

где  $i_{32} = -\frac{z_2}{z_3}$ ,  $i_{21}^* = i_{21}^{(0)} \left\{ \left(1 + \frac{\eta}{2}\right) + \frac{1}{2} \eta \cos 2\psi \right\}$ ,  $i_{21}^{(0)} = \frac{z_1}{z_2}$ ,  $\eta = \frac{\varepsilon}{z_1}$ ,  $\psi = \tilde{\varphi}_1 - \tilde{\varphi}_6 - \alpha_A$ .

Проведенный кинематический анализ позволяет исследовать влияние параметрического возмущения на работу автоматических регуляторов подачи. При этом исследуются две схемы (см. Рис. Ia и Ib) регуляторов, предназначенных для управления операцией сверления глубоких отверстий. Уравнения движения системы регулятора предполагаются уравнениями Лагранжа 2-го рода

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_1} = Q_{\varphi_1} \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_6} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_6} = Q_{\varphi_6} \quad (9)$$

где  $T$  - кинетическая энергия;

$Q_{\varphi_1}$  и  $Q_{\varphi_6}$  - обобщенные силы соответствующие координатам  $\varphi_1$  и  $\varphi_6$ . Периодическое поведение регулятора изучается на основе интегрирования дифференциальных уравнений движения методом "малого параметра" системы уравнений (8) и (9) в виде ряда по степеням параметра  $\eta = \frac{\varepsilon}{z_1}$

$$\varphi_k = \sum_{k=0}^{\infty} \eta^k \varphi_k \quad (10)$$

Отсюда находится приближенная амплитудно-частотная характеристика периодического движения по координате  $\varphi_6$

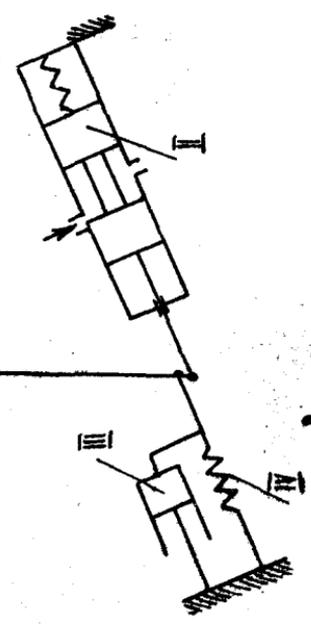
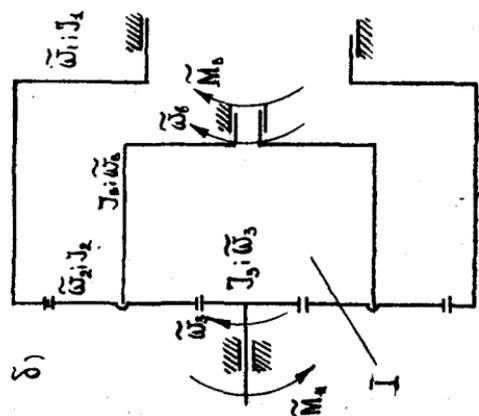
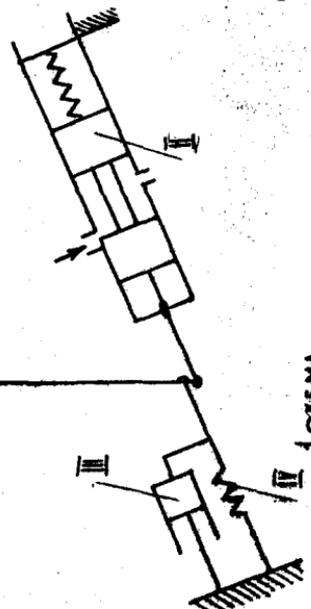
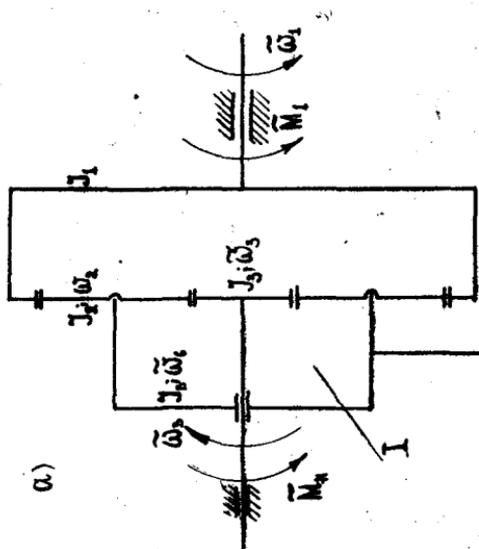
$$\varphi_6^{\max}(\omega_1) = A_1(\omega_1) + A_2(\omega_1) \sin[\pi + \theta_2(\omega_1) - 2\theta_1(\omega_1)] \quad (11)$$

где  $A_1(\omega_1)$ ,  $A_2(\omega_1)$ ,  $\theta_1(\omega_1)$ ,  $\theta_2(\omega_1)$  - величины, зависящие от геометрических параметров регуляторов и круговой частоты  $\omega_1$ .

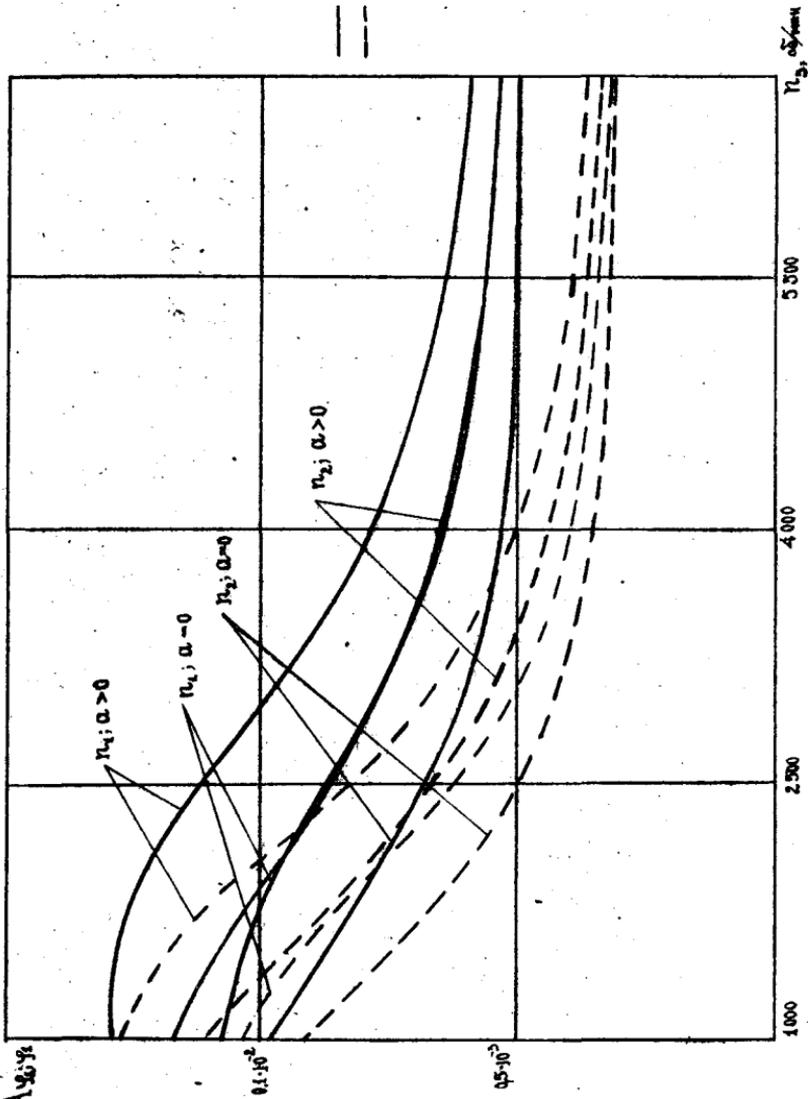
Такое исследование позволяет сравнить амплитудно-частотные характеристики регуляторов обеих схем. Наличие кинематического эксцентриситета является источником несимметричных автоколебаний. Несимметричность колебаний составляет величину второго порядка малости по сравнению с малыми параметром  $\eta$ .

Сравнительный анализ позволяет сделать вывод о преимуществе ре-

I) Малкин Н. Г. Некоторые задачи теории нелинейных колебаний. М., "Гостехиздат", 1956.



А. 2. 2



$\frac{1}{1000}$   
 $\frac{1}{1000}$

Рис. 2

гулятора, выполненного по первой схеме. Поэтому при разработке системы управления режимом сверления глубоких отверстий был применен регулятор этой схемы. Действенным средством уменьшения уровня автоколебаний является увеличение угловой частоты вращения эпицикла (см. Рис. 2). Но это в свою очередь завывает скорость резания. Поэтому при проектировании системы управления в ряде случаев нужно предусмотреть дополнительное приспособление для попутного вращения детали. Увеличение степени демпфирования так же уменьшает амплитуду автоколебаний (см. Рис. 2), но при этом уменьшается быстродействие регулятора. При обеспечении степени демпфирования  $\eta = 0,7 \div 0,8 \kappa$  ( $\kappa$  – собственная частота регулятора) передаточная функция регулятора по моменту нагрузки на инструмент имеет вид

$$W(s) = \frac{X_2(s)}{M(s)} = \frac{K_{yc}}{T_1^2 S^2 + T_2 S + 1}, \quad (12)$$

где

$$T_1^2 = \frac{J_3(1-i_{21})^2 + 2m_2 H_2^2 + 2J_4(1-i_{21}) + J_8 + m_2 l_2^2}{C_y L_2^2 + C_g L_g^2}; \quad (13)$$

$$T_2 = \frac{\beta L_g^2}{C_y L_2^2 + C_g L_g^2}; \quad (14)$$

$$K_{yc} = \frac{(1-i_{21}) L_g}{C_y L_2^2 + C_g L_g^2}; \quad (15)$$

Собственная частота регулятора равна  $\kappa = \frac{1}{T_1}$ . Математическая модель регулятора второго типа аналогична. Для уменьшения инерционности регулятора (уменьшения постоянной времени  $T_1$ ) существенную роль играет уменьшение осевого момента инерции шпинделя  $J_3$  и водила  $J_6$  механизма динамометрического узла.

Передаточная функция регулятора подачи для фрезерования пазов (по моменту нагрузки на фрезу) приближенно представлена передаточной функцией аperiodического звена первого порядка

$$W(s) = \frac{X_2(s)}{M_0(s)} = \frac{K_{yc}}{1 + T S}. \quad (16)$$

Эта аппроксимация осуществлена в области низких частот – до 5 1/с, что соответствует реальным условиям работы регулятора.

### РЕГУЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПАЗОВ

Возможность стабилизации момента нагрузки на сверло не вызывает сомнений уже на стадии проектирования системы, поскольку ни импульсные, ни периодические возмущения не являются типовыми для данного вида обработки.

Вопрос о возможности стабилизации момента нагрузки, а так же сум-

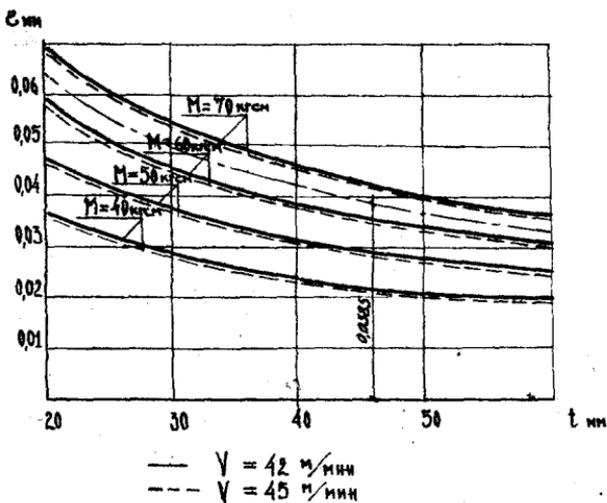


Рис. 3

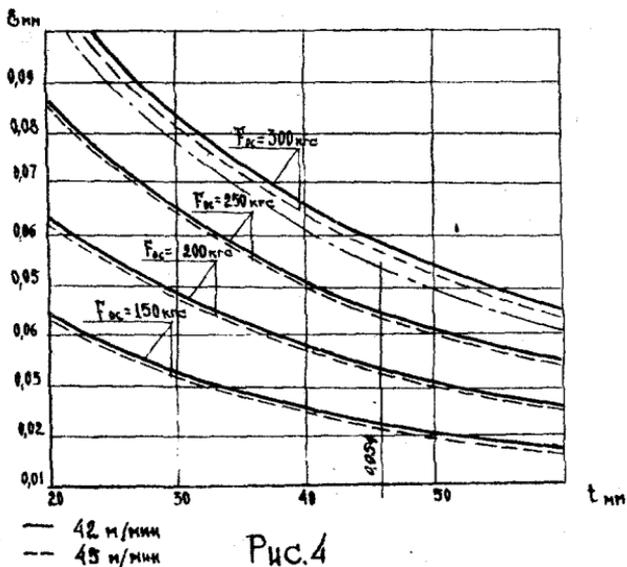


Рис. 4

марной силы подачи в условиях обработки эксцентрично посаженной фрезой важно решить на этапе проектирования систем управления режимом. Решение поставленной задачи на квазистатическом уровне показывает на возможность стабилизации силовых параметров обработки при условии, что величина суммарного эксцентриситета не превышает критического значения  $\epsilon_{кр}$ . Выражение для определения критического эксцентриситета при стабилизации величины  $M_\phi$  имеет вид

$$\epsilon_{кр}^N = \frac{M_\phi^{(0)}}{0,16 \sin \gamma \cdot \sin \frac{\pi N}{z} \cdot k_p^N}, \quad (17)$$

где  $N = [N_1] + 2$  при  $N_1 > [N_1] + 0,5$ ,  
 $N = [N_1] + 1$  при  $N_1 < [N_1] + 0,5$ ,  
 $[N_1]$  - целая часть величины  $N_1$ ,  $N_1 = \frac{z}{2\pi} \arccos \cos(1 - \frac{2t}{D_\phi})$ ;  
 $M_\phi^{(0)}$  - заданное значение момента нагрузки.

При стабилизации суммарной силы подачи величина критического эксцентриситета  $\epsilon_{кр}^F$  определяется из выражения

$$\epsilon_{кр}^F = \frac{F_x^{(0)}}{\frac{k_1 \sin \frac{\psi}{2} \cdot \sqrt{N^2 \sin^2 \psi \cdot \sin^2(2N\psi) - 2N \sin(2N\psi) \cos(N\psi) \sin \psi}}{\sin \psi}} \quad (18)$$

где  $F_x^{(0)}$  - заданное значение суммарной силы подачи.

Результаты исследований формул (17) и (18) приведены на рис.3 и рис.4. При глубине фрезеруемого паза 46 мм и скорости резания

$V = 42-45$  м/мин критический эксцентриситет составляет  $0,038 + 0,039$  мм, а при регулировании по силе подачи  $0,05 + 0,052$  мм. Полученные результаты показывают, что если бы осуществлялась стабилизация силы  $F_x$ , то она возможна при значениях эксцентриситета  $\epsilon^{(F)} \leq \epsilon_{кр}^{(F)}$ . Однако допускать предельных значений эксцентриситета нельзя, так как в этом случае фреза оказывается перегруженной по моменту  $M_\phi$ .

#### ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ С АВТОМАТИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПОДАЧИ

Алгоритм исследования устойчивости опирается на математическую основу метода, предложенного Хоном, Шридхаром и Лонгом<sup>1)</sup>.

Реализация алгоритма показана на примере исследования устойчивости системы регулирования подачи при фрезеровании пазов шириной 3мм на глубину 46 мм дисковой прямозубой фрезой диаметром 160 мм, имеющей 42 режущих зуба. На рис.5 показана расчетная схема системы.

1) HOHN R.E. Stability algorithm for a special case of the milling process.  
 SRIDHAR, Paper ASME, 1961, N-WA/Prod.  
 LONG G.W.

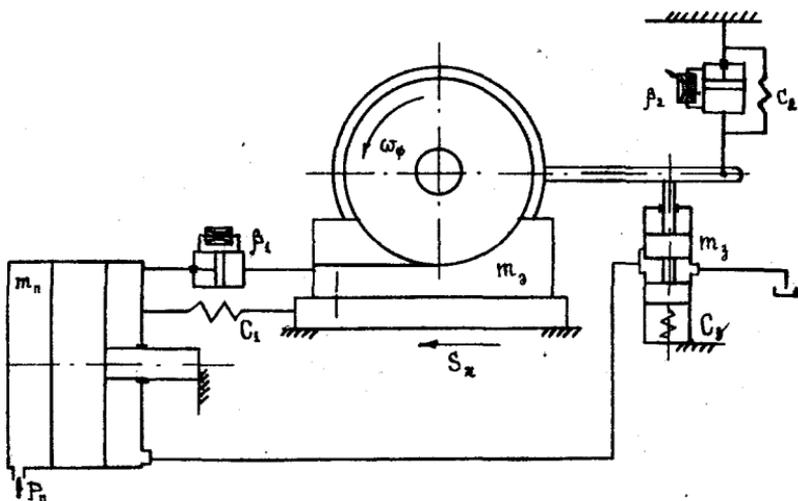


Рис. 5

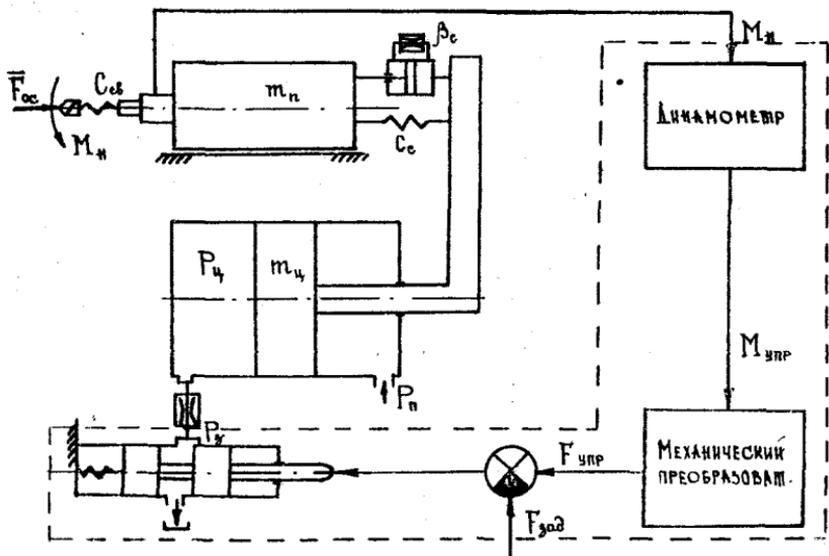


Рис. 6

Замкнутая математическая модель этой системы имеет вид

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d z_1}{d \varphi} &= z_2 \\ \frac{d z_2}{d \varphi} &= a_{22} z_2 + a_{23} z_3 + a_{24} z_4 \\ \frac{d z_3}{d \varphi} &= a_{33} z_3 + a_{31} \{z_1(\varphi) - z_1(\varphi - \psi)\} \sum_{i=1}^n f(\varphi_i) \sin[\varphi + (i-1)\psi + \gamma] \cdot \sin(\varphi_i + \frac{\psi}{2}) \\ \frac{d z_4}{d \varphi} &= a_{44} z_4 + a_{45} z_5 \\ \frac{d z_5}{d \varphi} &= a_{55} z_5 + a_{51} \{z_1(\varphi) - z_1(\varphi - \psi)\} \sum_{i=1}^n f(\varphi_i) \sin[\varphi + (i-1)\psi] \end{aligned} \right. \quad (19)$$

Построенная модель представляется системой линеаризованных дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом и периодическими коэффициентами. В векторной форме математическая модель имеет вид

$$\frac{d z}{d \varphi} = A_1(z) + A_2(\varphi) \cdot z_{(-\psi)} \quad (20)$$

Этому уравнению ставится в соответствие сопряженное векторное уравнение

$$\frac{d X}{d \varphi} = M(\nu) \cdot X, \quad (21)$$

где

$$M(\nu) = A_1 + A_2(\varphi) \cdot [-1 + \nu], \quad \nu = e^{j\theta}, \quad j = \sqrt{-1}.$$

$A_1$  - матрица постоянных коэффициентов;

$A_2(\varphi)$  - периодическая матрица с периодом  $\psi$ .

Далее застраивается фундаментальная матрица  $\Phi_{(n)}^{\nu}$  решений системы (21), определенная в конце одного периода  $\psi$ .

Следующим этапом является застройка матрицы

$$C = I - e^{j\theta} \cdot \Phi_{(n)}^{\nu} \quad (22)$$

и определение значения ее детерминанта

$$H(\nu) = \det [I - e^{j\theta} \cdot \Phi_{(n)}^{\nu}]. \quad (23)$$

По полученным значениям дискретно строится образ кривой

$$H_{(n)} = \operatorname{Re} H_{(n)} + j \operatorname{Im} H_{(n)}. \quad (24)$$

Критерий устойчивости заключается в том, что если исследуемый режим системы устойчив, то кривая не содержит внутри точки комплексной плоскости  $(0 + j0)$ . В противном случае режим неустойчив. Для численной реализации описанного алгоритма вычисляются коэффициенты постоянной матрицы  $A_1$  и задаются значения постоянной времени  $T_p$ . Так как экспериментальное определение  $T_p$  весьма сложно, то при решении задачи был задан диапазон значений постоянной времени. Ре-

результаты исследования показывают на большой запас устойчивости системы. Этот запас уменьшается с увеличением  $T_p$ . И только в области значений, превышающих 0,5с процесс становится неустойчивым.

Указанный алгоритм позволяет на этапе проектирования и разработки системы управления исследовать ее устойчивость, не осуществляя построение переходного процесса, математическая модель которого при фрезеровании сложна и громоздка.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА С АВТОМАТИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПОДАЧИ

Разработанная методика на основе исследования процесса резания и свойств автоматических регуляторов подачи предполагает построение математической модели и исследование переходного процесса системы с целью оценки качества регулирования и последующей коррекции элементов системы управления. Поэтапное выполнение методики показывается на примере системы управления режимом сверления отверстий диаметром 1,3 мм на глубину 16 мм в материале хромель (Cr - 9,5%; Ni - 90%), внедренной на одном из Казанских заводов. Расчетная схема исследуемой системы представлена на рис.6. Математическая модель процесса сверления на последнем проходе представляется системой нелинейных дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом, приведенной к виду, удобному для реализации на ЭЦМ.

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dY_2}{d\varphi_3} &= \frac{1}{\omega_3} 2 \sin \varphi_0 \{ Y_1(\varphi_3) - Y_1(\varphi_3 - \pi) \} \frac{Y_2}{\text{EXP} \{ 1.81 [ \ln Y_2 - 0.033 \ln (Z_{cb} \cdot \omega_3 \cdot 0.6) - 0.381 \times \\ &\quad \ln (Y_1(\varphi_3 - 0.1) - 0.079 \ln (\Delta L - 0.1) ] \frac{1}{T_m} - \frac{Y_2}{T_m} \cdot Y_1 = Y_3 - Y_2 \frac{K_F}{C_{cb}} ; \\ \frac{dY_3}{d\varphi_3} &= \frac{1}{\omega_3} Y_4 \\ \frac{dY_4}{d\varphi_3} &= \frac{C_c}{\omega_3 m_n} (Y_7 - Y_8) - \frac{K_F}{\omega_3 m_n} Y_2 - \frac{\beta_c}{\omega_3 m_n} (Y_4 - Y_8) - \frac{F_{np}}{\omega_3 m_n} \cdot \text{SIGN} Y_4 \\ \frac{dY_5}{d\varphi_3} &= \frac{1}{\omega_3} Y_6 \\ \frac{dY_6}{d\varphi_3} &= \frac{K_{vc}}{T_1^2 \omega_3} Y_2 - \frac{T_2}{T_1^2 \omega_3} Y_6 - \frac{1}{T_1^2 \omega_3} Y_5 - \frac{K_x}{T_1^2 \omega_3} \\ \frac{dY_7}{d\varphi_3} &= \frac{1}{\omega_3} Y_8 \\ \frac{dY_8}{d\varphi_3} &= \frac{P_n S_n}{m_4 \omega_3} - (A_p + \frac{B_p}{\varphi^2(Y_5)}) \cdot \frac{S_4}{m_4 \omega_3} Y_8^2 - \frac{C_c}{m_4 \omega_3} (Y_7 - Y_8) - \frac{\beta_c}{m_4 \omega_3} (Y_8 - Y_4) - \frac{F_{np}}{m_4 \omega_3} \cdot \text{SIGN} Y_8. \end{aligned} \right. \quad (25)$$

Интегрирование системы (25) осуществляется при начальных условиях обработки на последнем проходе многопроходной обработки отверстия. Ре-

зультаты расчетов представлены на рис.7, где показана зависимость момента нагрузки  $M_n$  от текущего угла поворота сверла  $\varphi_3$ . Кривая 6 соответствует отключенному регулятору. Кроме указанной информации строятся графики зависимостей фазовых координат в функции угла  $\varphi_3$ . Полученные результаты позволяют на стадии проектирования оценить предполагаемое качество управления режимом обработки, скорректировать параметры настройки регуляторов. найти номинальную степень его демпфирования. Так, например, при решении поставленной задачи было установлено, что области устойчивой работы соответствует  $T_2 > 0,018c$ , области автоколебаний  $0,015 < T_2 < 0,018c$ , области неустойчивой работы  $T_2 \leq 0,01c$ . Общая поправка настройки регулятора составляет около 0,14 кгс·см при статической настройке на величину момента нагрузки на инструмент  $M_n = 1,0$  кгс·см. Разработанная автором программа, написанная на языке АЛГОЛ-60, является универсальной для семейства систем исследуемого класса.

#### АППРОКСИМАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА С АВТОМАТИЧЕС- КИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПОДАЧИ

Проведенные исследования показывают, что разработанные математические модели описываются либо системой нелинейных дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом, либо системой линейных уравнений с запаздывающим аргументом и периодическими коэффициентами. Это создает ряд трудностей, связанных с реализацией задач на ЭЦВМ, поскольку требует большой оперативной памяти и значительной производительности вычислительной машины, а так же дополнительных средств в программировании. Наличие запаздывающих аргументов определено уравнением звена, моделирующего формирование толщины срезаемого слоя. Применительно к процессу сверления это уравнение имеет вид

$$a(\tau) = x_{cb}(\tau) - x_{cb}(\tau - \frac{\tau_0}{2}) \cdot k, \quad (26)$$

где  $k$  - геометрический коэффициент пропорциональности;  
 $\tau_0$  - время одного оборота инструмента.

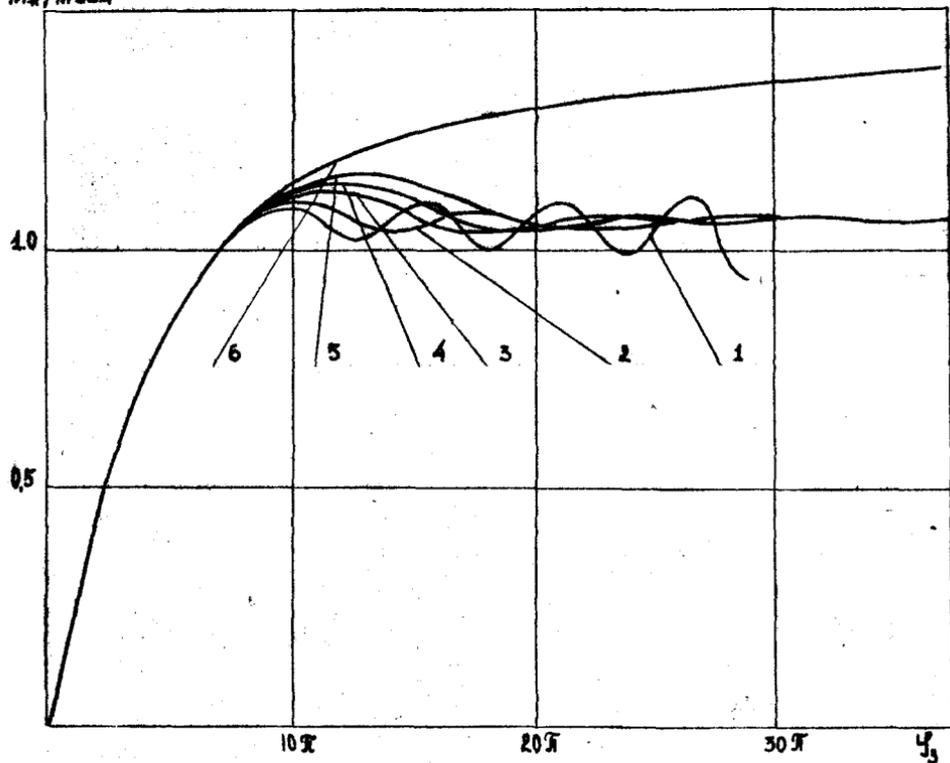
Передаточная функция рассматриваемого звена имеет вид

$$W(s) = \frac{A(s)}{X_{cb}(s)} = (1 - e^{-\frac{\tau_0}{2}s}) \cdot k. \quad (27)$$

М.М.Тверским было показано, что при выполнении условия  $\omega \tau_0 \leq 2\pi$  функцию (27) с достаточной степенью точности можно аппроксимировать с помощью разложения экспоненты  $e^{-\frac{\tau_0}{2}s}$  в ряд Паде

$$e^x = \lim_{(n+m) \rightarrow \infty} \frac{F_{n,m}(x)}{G_{n,m}(x)}, \quad (28)$$

$M_{\text{н}}, \text{ кгссм}$



1.  $T_2 = 0,01 \text{ c}$

4.  $T_2 = 0,07 \text{ c}$

2.  $T_2 = 0,02 \text{ c}$

5.  $T_2 = 0,1 \text{ c}$

3.  $T_2 = 0,05 \text{ c}$

6.  $K_{\text{yc}} = 0$

Рис. 7

где  $x = -\frac{\tau_0^* S}{2}$ ,  $F_{n,m}(x) = 1 + \frac{m x}{(n+m)!} + \frac{m(m-1)x^2}{(n+m)(n+m-1)2!} + \frac{m(m-1)(m-2)x^3}{(n+m)(n+m-1)(n+m-2)3!} + \dots$

$$G_{n,m}(x) = 1 - \frac{n x}{(n+m)!} + \frac{n(n-1)x^2}{(n+m)(n+m-1)2!} - \frac{n(n-1)(n-2)x^3}{(n+m)(n+m-1)(n+m-2)3!} + \dots$$

При  $n = m = 2$ .

$$e^{-\tau_0^* S} = \frac{12 - 6\tau_0^* S + \tau_0^{*2} S^2}{12 + 6\tau_0^* S + \tau_0^{*2} S^2}, \quad (29)$$

где  $\tau_0^* = \frac{\tau_0}{2}$ .

Отсюда передаточная функция, аппроксимирующая первообразную передаточную функцию (27), имеет вид

$$W_{ан}(S) = \frac{S \tau_0^*}{1 + \frac{S \tau_0^*}{2} + \frac{S^2 \tau_0^{*2}}{12}}. \quad (30)$$

Исследования показывают, что аналогичный результат получается при использовании разложения экспоненты  $e^x$  в цепную дробь Эйлера<sup>1)</sup>

$$e^x = 1 + \frac{x}{1} - \frac{x}{2} - \frac{x}{5} - \frac{x}{2} + \dots \quad (31)$$

Передаточная функция (30) соответствует дифференциальному уравнению

$$\frac{\tau_0^{*2}}{12} \frac{d^2 a}{d\tau^2} + \frac{\tau_0^*}{2} \frac{da}{d\tau} + a = K \cdot \tau_0^* \cdot \frac{d x_{св}}{d\tau}. \quad (32)$$

В результате аппроксимация приводит к появлению в замкнутой математической модели процесса сверления следующих двух уравнений

$$\frac{dy_2}{dy_3} = \frac{da}{d\varphi} \quad (33)$$

$$\frac{dy_{10}}{dy_3} = 12K \left( \frac{dx_n}{d\tau} - \frac{K_F}{C_{об}} \cdot \frac{dy_2}{d\varphi} \cdot \omega_3 \right) / (3,14 \cdot \omega_3) - \frac{6}{3,14} \cdot y_{10} - \frac{12}{3,14} \cdot a.$$

Математическая модель представляется системой обыкновенных дифференциальных уравнений, что позволяет решать задачу исследования динамики процесса обработки на ЭВМ типа "Мир" или "Наири", обладающих малой производительностью и оперативной памятью. Аппроксимирующая модель была опробована на вышеизложенном примере. Сравнение первообразного и аппроксимирующего переходных процессов показывает на то, что ошибка от аппроксимации по величине  $M_n$  на различных исследуемых режимах составляет меньше 0,5%. Отсюда следует, что исследование динамики процесса сверления с автоматическим регулированием подачи можно осуществлять на упрощенной модели, сохраняя при этом как качественную, так и количественную оценки достаточно близкими к оценкам реального процесса.

1) Хованский А.Н. Приложение цепных дробей и их обобщений к вопросам приближенного анализа, М., Гостехиздат, 1956.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования возможности стабилизации силовых параметров при выполнении технологической операции фрезерования пазов позволили регламентировать условия, обеспечивающие эту стабилизацию. Стабилизация в условиях обработки эксцентрично посаженной фрезой возможна, если величина эксцентricитета не превышает критического значения, зависящего от заданных значений величины крутящего момента (суммарной силы подачи), глубины фрезерования и свойств системы управления режимом обработки.

2. Предложенный метод расчета автоматических регуляторов подачи, выполненных на базе дифференциальных механизмов с учетом технологических погрешностей изготовления их элементов, позволяет на этапе проектирования рационально скорректировать параметры регуляторов и выбрать наиболее приемлемую схему построения динамометрического узла.

3. Использование модифицированного критерия устойчивости и соответствующее моделирование звеньев системы дают возможность исследовать устойчивость процесса фрезерования пазов с автоматическим регулированием подачи с учетом динамической характеристики процесса резания.

4. Упрощенный метод построения и исследования моделей процессов обработки с автоматическим регулированием подачи является инженерным методом, доступным технолгам, занимающимся решением задач оптимального управления режимом.

5. Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о том, что поставленные выше задачи решены.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ АВТОРА:

1. Реализация на ЭЦВМ алгоритма исследования устойчивости системы автоматического регулирования процесса фрезерования глубоких и узких пазов. - Информационный листок КУМЦНТИ, Челябинск, 1972.

2. О влиянии биения фрезы на регулирование процесса обработки глубоких и узких пазов. - В сб. "Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки", № II4, ЧПИ, Челябинск, 1972.

3. Исследование устойчивости САР фрезерования глубоких и узких пазов. Там же.

4. Построение математических моделей и исследование динамики адаптивных систем управления процессами обработки лезвийным инструментом. - Тезисы докладов к совещанию "Повышение производительности

металлорежущих станков и точности обработки путем применения адаптивных систем", Ленинград, ЛДНТП, 1973 (совместно с Тверским М.М.).

5. Исследование динамики автоматических регуляторов режима механической обработки. - В сб. "Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки", № 145, ЧПИ, Челябинск, 1974.

6. К вопросу аппроксимации силовых и стойкостных зависимостей при механической обработке. Там же. (Совместно с Тверским М.М.).

7. Динамика автоматических регуляторов подачи для сверления глубоких отверстий. - В сб. "Вопросы улучшения динамических характеристик машин", № 175, ЧПИ, Челябинск, 1976.

8. Математическое моделирование систем управления процессом глубокого сверления. - Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Оптимизация технологических процессов механической обработки деталей и сборки приборов", Киев, РДЭНТП, 1978 (совместно с Тверским М.М.).

9. Построение переходного процесса САУ режимом сверления глубоких отверстий малого диаметра. - В сб. "Вопросы улучшения динамических характеристик машин", ЧПИ, Челябинск, 1978 (в печати).

10. Динамика системы автоматического управления процессом глубокого сверления. - В сб. "Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки", ЧПИ, Челябинск, 1978 (в печати).