

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР



Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

Нагуло Анатолий Никитович

ИССЛЕДОВАНИЕ И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ГЛУБОКИХ
ПАЗОВ ДИСКОВЫМИ ФРЕЗАМИ

Специальность 05.02.08 -
"Технология машиностроения"

Автореферат
диссертации на соискание
ученой степени кандидата
технических наук

Челябинск
1975

Работа выполнена на кафедре "Технология машиностроения" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
Тварской М.М.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Матвеев В.В.,
кандидат технических наук, доцент
Трошин Е.Н.

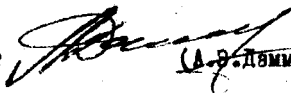
Ведущее предприятие - Златоустовский машиностроительный завод имени В.И.Ленина.

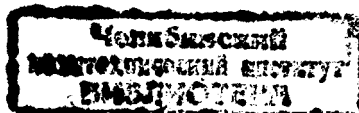
Автореферат разослан " _____ " _____ 1975 года.

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

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
кандидат технических наук, доцент


(А.Р.Деммер)



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Особенности процесса фрезерования глубоких пазов являются малая прочность и жесткость режущего инструмента, низкая стойкость и частые его поломки. Фрезерование пазов в большинстве случаев производится с постоянной величиной подачи. Вследствие изменения характеристик обрабатываемого материала, качества изготовления, заточки и степени затупления режущего инструмента, глубины фрезеруемого паза и других параметров нагрузки на инструмент при обработке изменяется в широких пределах. Поэтому фрезерование глубоких пазов производится на заниженных режимах резания. Это снижает производительность обработки, не позволяет полностью использовать возможности инструмента и не гарантирует отсутствия поломок фрез.

Улучшение качественных показателей процесса обработки, повышение его производительности и снижение затрат может быть достигнуто применением систем автоматического управления (САУ), обеспечивающих постоянство нагрузки на инструмент. Использование систем управления силовыми параметрами наиболее эффективно в условиях малой прочности инструмента, что характерно для рассматриваемого процесса.

Созданные к настоящему времени САУ процессом фрезерования сложны по конструкции и в настройке, отличаются малой надежностью и высокой стоимостью. Поэтому разработка и исследование простых и надежных САУ процессом фрезерования является актуальной научной проблемой.

Цель исследования - разработка простых по конструкции и надежных в эксплуатации систем автоматического управления процессом фрезерования глубоких пазов шириной 1-3 мм, обеспечивающих повышение производительности, точности обработки и предохранение инструмента от поломок.

Задачи исследования:

1. Получить аналитическое выражение критерия оптимальности режима фрезерования глубоких пазов.
2. Провести экспериментальное исследование процесса фрезерования глубоких пазов для определения зависимостей стойкости инструмента и силовой нагрузки на него от параметров режима обработки.
3. Разработать алгоритм оптимального управления процессом обработки пазов на основе критерия оптимальности, стойкостной и силовых зависимостей.

4. Разработать принципиальные схемы САУ и определить их основные конструктивные параметры.
5. Создать эффективные системы управления процессом фрезерования глубоких пазов, провести их производственные испытания и внедрение.

Научная новизна. 1. Разработан алгоритм оптимального управления процессом фрезерования глубоких пазов с учетом ограничений по нагрузке на инструмент, предусматривающий достижение минимума приведенных затрат на обработку.

2. Предложена методика экспериментально-аналитического исследования, позволяющая для каждого конкретного случая обработки выбрать и назначить величину контролируемого параметра нагрузки на фрезе, исходя из условия обеспечения наименьших затрат на обработку и надежной защиты инструмента от поломок.

3. Разработан инженерный метод исследования, на основе которого находится связь между основными конструктивными параметрами САУ, её статической характеристикой и величиной приведенных затрат на обработку.

4. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны и созданы оригинальные САУ с контролем момента и горизонтальной составляющей силы резания.

Практическая полезность. 1. Разработаны и внедрены в производство промышленные варианты САУ с контролем момента и горизонтальной составляющей силы резания, позволяющие увеличить производительность обработки глубоких пазов в 1,3-1,5 раза, исключить поломки фрез, повысить стойкость инструмента на 30-40%.

2. Промышленные варианты САУ отличаются простотой конструктивного исполнения, высокой надежностью и малой стоимостью и могут быть установлены на любой горизонтально-фрезерный станок.

3. Результаты экспериментальных и теоретических исследований могут быть использованы при создании САУ для других операций.

Реализация научно-технических результатов в промышленности. Разработанная САУ с контролем момента резания внедрена на Златоустовском машиностроительном заводе им. В.И.Ленина на операции фрезерования пазов шириной 3 мм и переменной глубиной от 10 до 46 мм. Годовой экономический эффект составил 29500 руб.

Разработан второй вариант САУ с контролем горизонтальной составляющей силы резания. Этой системой оснащено 2 станков, которые

внедрены в производство. Годовой экономический эффект от внедрения составляет 1670 руб. в расчете на один станок.

В настоящее время разработана и испытана в лабораторных условиях усовершенствованная САУ с контролем горизонтальной составляющей силы резания. Ведутся работы по её внедрению.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации автором докладывались:

1. На научно-технических конференциях в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола в 1971-75 гг.
2. На Всесоюзном совещании-семинаре "Повышение производительности металлорежущих станков и точности обработки путем применения адаптивных систем", Ленинград, 1973 г.

Публикация. По материалам диссертации автором опубликовано девять печатных работ, в том числе авторское свидетельство на изобретение.

Структура и объем работы. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста; состоит из введения, пяти глав и заключения. Список литературы содержит 97 наименований. В работе 66 иллюстраций и 3 приложения.

Принятые обозначения

- $У$ - приведенные хозрасчетные затраты предприятия, обусловленные одной минутой работы станка и рабочего без затрат на режущий инструмент, коп./станко-мин.;
- τ_m - машинное время, мин.;
- $\tau_{см}$ - время простоя станка, связанного со сменой режущего инструмента, мин.;
- C_u - приведенные хозрасчетные затраты предприятия, обусловленные эксплуатацией режущего инструмента за период его стойкости, включая затраты на переточку и заработную плату наладчика, коп.;
- N - число деталей, обработанных за период стойкости инструмента;
- v - скорость резания, м/мин.;
- S_f - подача на один зуб фрезы, мм/зуб;
- t - глубина фрезеруемого паза, мм;
- T - период стойкости инструмента, мин.;
- D - диаметр фрез, мм;
- L, B - длина и ширина фрезеруемого паза, мм;

z_{ϕ}, n_{ϕ} - число зубьев и число оборотов фрезы в I мин.;

$$A = \frac{\pi \cdot D}{B \cdot z_{\phi}} \cdot y; \quad B = \frac{\pi D}{B z_{\phi}} (y \tau_{cm} + C_u);$$

T_3, T_p - экспериментальное и расчетное значение стойкости, мин.;

M - величина крутящего момента на фрезу, кгс-м;

P_r - горизонтальная составляющая силы резания, кгс;

$\Delta M, \Delta P$ - величины статической неравномерности, кгс-м, кгс;

Q - расход рабочей жидкости через регулятор подачи, л/мин.;

C_1, C_2 - жесткость пружин растяжения и сжатия, кгс/мм;

L_1, L_2 - плечо приложения усилия пружины растяжения и сжатия, мм;

h_{np}, h_{sp} - предварительное растяжение и сжатие пружин, мм;

m, a - величина открытия и ширина дроссельной канавки, мм;

z_k, β - число и угол наклона канавок;

f - площадь проходного сечения канавок регулятора, см²;

$F_{сл}$ - площадь поршня со стороны сливной магистрали, см²;

$p_p, p_{сл}$ - давление на поршень регулятора со стороны рабочей и сливной полостей пневмогидроцилиндра подачи, кгс/см²;

$f_{p, сл}$ - величины активных площадей поршня регулятора, см²;

$\Sigma P_{тр}$ - суммарная сила трения в уплотнениях поршня и штоке цилиндра подачи и в направляющих стола, кгс.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ГЛУБОКИХ ПАЗОВ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ОБРАБОТКИ

Выбор критерия оптимальности. Основным показателем эффективности обработки деталей является величина приведенных козрасчетных затрат предприятия, учитывающих технологическую себестоимость изготовления детали требуемого качества и эффективность капитальных вложений в оборудование, на котором производится обработка^{*}). Величина этих затрат на технологическую операцию определяется следующим выражением:

$$C_{пх} = y \tau_m + \frac{y \tau_{cm} + C_u}{N} \quad (1)$$

^{*}) Великанов К.М., Новожилов В.И. Экономичные режимы резания металлов. Д., "Машиностроение", 1972.

Выразив τ_M и N через параметры режима и стойкость инструмента, получим

$$C_{\text{пз}} = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{1000 \cdot \pi \cdot \varphi} \cdot \left(\frac{y}{v \cdot s_x} + \frac{y \cdot \tau_{\text{см}} + C_u}{v \cdot s_x \cdot T} \right). \quad (2)$$

Объем металла Q_M , удаленного в процессе обработки пазы, определяется по формуле

$$Q_M = B \cdot L \cdot t \cdot 10^{-3} \quad \text{см}^3. \quad (3)$$

Величина средних за период стойкости инструмента затрат^{*}), приходящихся на 1 см³, снимаемого при обработке материала, выражается зависимостью:

$$K = \frac{C_{\text{пз}}}{Q_M} = \frac{A}{v \cdot s_x \cdot t} + \frac{B}{v \cdot s_x \cdot t \cdot T} \quad \frac{\text{коп}}{\text{см}^3}. \quad (4)$$

Зависимость (4) является математическим выражением критерия оптимальности. Как следует из этой зависимости, величина затрат в значительной мере определяется стойкостью режущего инструмента.

Экспериментальное определение стойкостной зависимости. Для оптимизации режима обработки глубоких пазов принята зависимость стойкости от скорости резания, подачи и глубины фрезеруемого пазы в виде:

$$T = \exp \left(c_0 - \frac{k_v}{m} v^m - \frac{l_s}{n} s_x^n - \frac{j_t}{q} t^q \right). \quad (5)$$

Уравнение (5) позволяет весьма точно аппроксимировать экспериментальную стойкостную зависимость в широком диапазоне параметров v , s_x и t .

Определение коэффициентов и показателей степени c_0 , k_v , m , l_s , n , j_t и q , входящих в (5), проведено на основе экспериментальных исследований стойкости дисковых фрез из быстрорежущей стали P18 диаметром 160 мм. В стали 35ХЗНМ фрезеровались пазы шириной 3 мм и переменной глубиной от 10 до 45 мм. Твердость обрабатываемого материала - HRC 22 - 26. Используя экспериментальные данные, с помощью ЭЦВМ "Минск-22"

* Здесь и в дальнейшем под термином "затраты" следует понимать приведенные среднестатистические затраты предприятия.

определены искомые коэффициенты из условия минимума суммы квадратов отклонений:

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(T_3 - T_p)^2}{T_3}$$

Отыскание минимума функции " δ " осуществлялось на ЭЦВМ быстросходящимся методом наискорейшего спуска. С учетом найденных значений коэффициентов уравнение (5) принимает вид

$$T = \exp(14,484 - 0,447 \cdot v^{0,539} - 29,747 \cdot S_z^{0,728} - 3,067 \cdot t^{0,158}). \quad (6)$$

Определение оптимальных параметров режима обработки. Задача оптимального управления процессом обработки глубоких пазов сводится к отысканию таких численных значений v_o , S_{zo} и t_o , при которых достигается минимум выражения (4). Подставим уравнение стоимости (5) в выражение (4):

$$K = \frac{A}{v \cdot S_z \cdot t} + \frac{B}{v S_z t \cdot \exp\left(c_o - \frac{k_v}{m} \cdot v^m - \frac{l_s}{n} \cdot S_z^n - \frac{j_t}{q} \cdot t^q\right)} \quad (7)$$

Найдем частные производные выражения (7) по переменным v , S_z и t и приравняем их нулю. После соответствующих преобразований имеем:

$$v_o^m = \frac{\ln \frac{A}{B} + c_o - \frac{k_v}{m} \cdot v^m - \frac{j_t}{q} \cdot t^q - \ln(k_v \cdot v^m - 1)}{\frac{k_v}{m}}; \quad (8)$$

$$S_{zo}^n = \frac{\ln \frac{A}{B} + c_o - \frac{k_v}{m} \cdot v^m - \frac{j_t}{q} \cdot t^q - \ln(k_v \cdot v^m - 1)}{\frac{l_s}{n}}; \quad (9)$$

$$k_v \cdot v_o^m = l_s \cdot S_{zo}^n = j_t \cdot t_o^q. \quad (10)$$

Трансцендентное уравнение (8) может быть решено методом приближений. Полученное значение v_o из уравнения (8) подставим в (9) и (10), с помощью которых определим S_{zo} и t_o . Рассчитанные таким способом оптимальные режимы резания не всегда могут быть реализованы в силу различных ограничений, вызванных технологическими возможностями станка или инструмента.

Основные ограничения при обработке глубоких пазов определяются прочностью диска фрезы и прочностью отдельного зуба. Разрыв диска фрезы наступает в том случае, когда суммарный крутящий момент от сил резания на зубах фрезы достигает критического значения. При малой глубине фрезеруемого паза (особенно на входе и вы-

ходе фрезы), когда в работе участвует небольшое число зубьев, основным ограничивающим параметром становится нагрузка на один зуб.

В процессе обработки измерять силы резания на отдельных зубьях фрезы сложно. Поэтому косвенным параметром контроля нагрузки на фрезу может быть принята горизонтальная составляющая силы резания P_r .

Экспериментальное определение силовых зависимостей. Исследования силовых зависимостей проводилось на специально созданной экспериментальной установке. Измерение горизонтальной составляющей P_r осуществлялось с помощью специального динамометрического стола. Для измерения момента резания был спроектирован и изготовлен малоинерционный редукторный динамометр планетарного типа. Эксперименты проводились в тех же условиях, что и при определении стойкостной зависимости. Запись значений M и P_r осуществлялась с помощью двух электронных самопишущих потенциометров переменного тока ЭМП-209МЗ.

Математическая обработка результатов эксперимента показала, что из трех использованных аппроксимирующих функций наименьшее среднеквадратическое отклонение получается при аппроксимации силовых зависимостей степенной функцией следующего вида:

$$M = 41,5 \cdot v^{0,212} \cdot S_z^{0,86} \cdot t^{0,933}; \quad (11)$$

$$P_r = 273,1 \cdot v^{0,205} \cdot S_z^{0,73} \cdot t^{0,631}. \quad (12)$$

Экспериментальные исследования показали, что величина момента резания, при которой наступает частая поломка фрез, составляет 78-80 кгс.м. Допустимая величина момента на фрезу (M_0) с учетом коэффициента запаса $k_3 = 1,2$ должна быть установлена для рассматриваемого случая равной 65 кгс.м.

II. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА, ВЫБОР И НАЗНАЧЕНИЕ КОНТРОЛИРУЕМОГО ПАРАМЕТРА НАГРУЗКИ НА ФРЕЗЕ

Разработка алгоритма оптимального управления процессом. Из уравнений (8) и (9) определим оптимальные сочетания U_0 и S_{z0} при фиксированных t . Полученные таким способом точки $F_{10}, F_{15}, \dots, F_{45}$ на рис. I в логарифмических координатах образуют геометрическое место точек (прямая ОС) абсолютных минимумов затрат

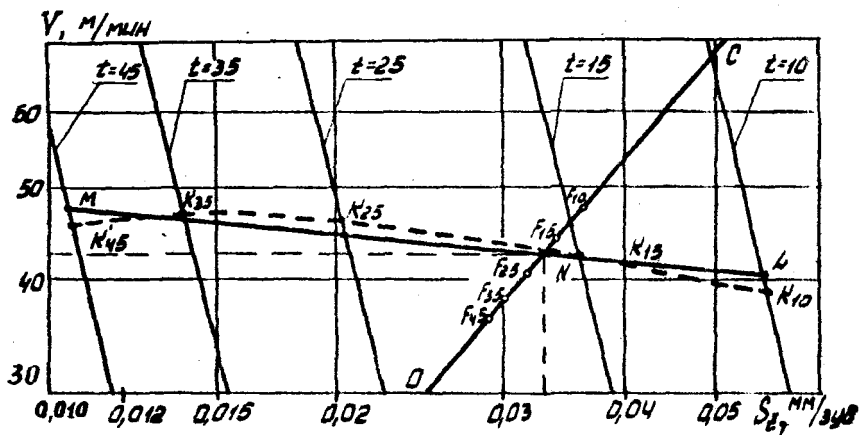


Рис. 1

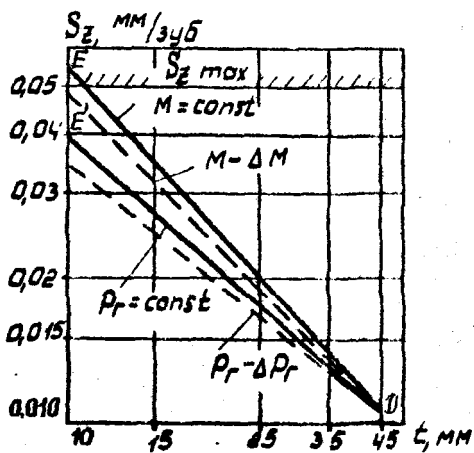


Рис. 2

без учета ограничений. Аналитическим уравнением линии ОС является первое соотношение выражения (III):

$$K_v \cdot v^m = i_s \cdot S_z^n \quad (13)$$

Для нахождения v_0 и S_{z0} с учетом основного ограничения из выражения (II) получим зависимость v от S_z и t при предельно допустимом значении момента ($M_a = 35 \text{ кгс.м}$):

$$v = \left(\frac{M_a}{41,5 \cdot S_z^{0,86} \cdot t^{0,212}} \right)^{1/0,212} \quad (14)$$

На рис. I нанесены линии ограничений для $t = 10, 15, \dots, 45 \text{ мм}$, полученные из выражения (14). Рассчитав значения "K" по выражению (7) вдоль каждой линии ограничения, найдем такие v_0 и S_{z0} , при которых затраты на обработку будут наименьшими. Пунктирная кривая $ML (K_{10}, K_{15}, \dots, K_{45})$ на рис. I представляет собой геометрическое место точек условных экстремумов функции "K" при наличии связи (II) и является изображением алгоритма оптимального управления с учетом ограничения по моменту. С помощью ЭВМ получено аналитическое выражение аппроксимирующей функции для этой кривой:

$$v = 28,918 \cdot S_z^{-0,109} \quad (15)$$

Линии ML и OC пересекаются в точке N , координаты которой определяются совместным решением уравнений (13) и (15). Подставив координаты этой точки в уравнение (II), получим $t_N = 16,18 \text{ мм}$. Из рис. I следует, что линии ограничения не охватывают точек абсолютных минимумов функции "K" при $t \geq 16,18 \text{ мм}$, т.е. эти минимумы находятся за пределами ограничений. В этом случае достижимые минимальные значения "K" лежат на линиях ограничений (прямая MM). При значениях $t \leq 16,18 \text{ мм}$ алгоритму оптимального управления соответствует прямая NC (отрезок OC).

Полный алгоритм управления рассматриваемым процессом изображается ломаной MNC и описывается системой уравнений (13) и (15):

$$v = \begin{cases} 28,918 \cdot S_z^{-0,109} & \text{при } t \geq 16,18 \text{ мм;} \\ 4204 \cdot S_z^{1,33} & \text{при } t \leq 16,18 \text{ мм.} \end{cases}$$

ж) Зависимость $v (S_z)$ может быть получена аналитическим решением задачи на условный экстремум функции 3-х переменных (методом Лагранжа). Уравнение этой зависимости для общего случая механической обработки приведено в докторской диссертации М.М. Тверского.

Расчеты показывают, что разность приведенных затрат на обработку пазов при переходе с участка NC на NL составляет в среднем не более 3,5%, поэтому управление процессом можно вести по прямой MNL во всем рассматриваемом диапазоне t . При этом, с целью предохранения инструмента от поломок при малых значениях t , следует ограничить подачу на зуб величиной $S_z \leq 0,05$ мм/зуб.

Обоснование способа управления. Согласно полученному алгоритму управления САУ должна осуществлять одновременное изменение скорости резания и подачи. Проведенное аналитическое исследование по выбору способа управления показало, что с учетом дополнительных капитальных вложений на изготовление САУ приведенные затраты на обработку пазов в конкретной детали при одновременном управлении V и S_z несколько выше, чем при управлении только S_z при $V = const$. При этом величине скорости резания, равная 44,3 м/мин., была определена из уравнений (II) и (I3) для среднего значения глубины фрезеруемого паза. Следовательно, для рассматриваемого случая обработки необходимо создавать систему с одним управляемым параметром S_z .

Выбор и назначение контролируемого параметра нагрузки на фрезе.

Проведем анализ изменения момента на фрезе при постоянном значении P_r . Из (I2) найдем значение подачи S_z при $P_r = P_{r0} = const$, подставим в (II) и после преобразований получим:

$$M = 41,5 \left(\frac{P_{r0}}{273,1} \right)^{1,178} \cdot V^{-0,0295} \cdot t^{0,189} \quad (I6)$$

Соотношение (I6) показывает, что при обработке с постоянным значением P_r с уменьшением t момент резания на фрезе уменьшается. Это до некоторой степени выравнивает нагрузку на каждый зуб фрезы и благоприятно сказывается на стойкости инструмента.

Рассмотрим изменение P_r при постоянном значении момента. Из уравнения (II) определим значение S_z при $M = M_0 = const$ и подставим его в (I2). После упрощения имеем:

$$P_r = 273,1 \left(\frac{M_0}{41,5} \right)^{1,189} \cdot V^{0,0288} \cdot t^{-0,161} \quad (I7)$$

Из (I7) следует, что при $M = const$ с уменьшением t горизонтальная составляющая силы резания несколько возрастает. Это является косвенным свидетельством увеличения нагрузки на один зуб фрезы. Однако это не опасно, так как величина подачи при малых t ограничена $S_z \leq 0,05$ мм/зуб. Кроме того, возрастание P_r с умень-

шением t можно значительно уменьшить за счет правильного выбора статической характеристики САУ^ж). На рис.2 в логарифмических координатах представлено графическое изображение основного ограничения $M \leq M_0$. Этому ограничению в рабочем диапазоне $t = (10; 45)$ мм соответствует линия ED , построенная по уравнению (II) при $M_0 = 65$ кгс.м и $V = 44,3$ м/мин.

Допустимую величину P_{r_0} для настройки САУ следует выбирать такой, чтобы линия, соответствующая ей на рис.2 (прямая ED), проходила через точку Д, соответствующую наибольшему значению t . Принимая $t = 45$ мм при $V = 44,3$ м/мин., из (II) и (12) получим $P_{r_0} = 238$ кгс.

Из предыдущего следует, что для рассматриваемых условий обработки при проектировании САУ в качестве контролирующего параметра можно принимать как величину M , так и P_r , при этом предпочтение следует отдавать САУ с контролем момента резания.

III. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ И ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ САУ С КОНТРОЛЕМ НАГРУЗКИ НА ИНСТРУМЕНТ

Разработка принципиальной схемы САУ с контролем момента резания.
На основе анализа полученного алгоритма и силовых зависимостей процесса для конкретной операции фрезерования глубоких пазов разработана система автоматического управления подачей для горизонтально-фрезерных станков. Принципиальная схема приведена на рис.3. Измерение момента в процессе обработки производится с помощью малоинерционного редукторного динамометра I [5]. Бесступенчато-регулируемый привод подачи выполнен пневмогидравлическим. Шток пневмогидроцилиндра 2 закреплен неподвижно, а цилиндр жестко связан со столом станка.

В исходном крайнем правом положении стола линейка 3 нажимает на рычаг золотника ускоренных ходов 4. Под действием сжатого воздуха, подаваемого в левую полость пневмогидроцилиндра 2, масло из его правой полости вытесняется в гидробак 6 через золотник 4 и регулятор рабочей подачи 5. Осуществляется ускоренное перемещение стола влево. При сходе выступающей части линейки 3 с рычага золот-

ж) Тверской М.М. Вопросы расчета и проектирования систем автоматического регулирования подачи при токарной обработке. Сб. "Самоподнастраивающиеся станки", М., "Машиностроение", 1967.

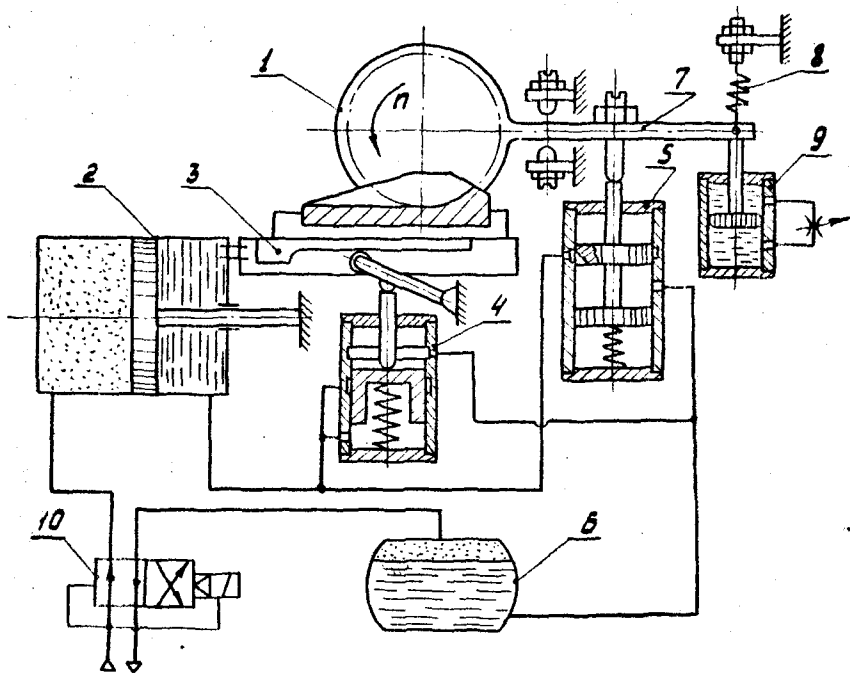


Рис. 3

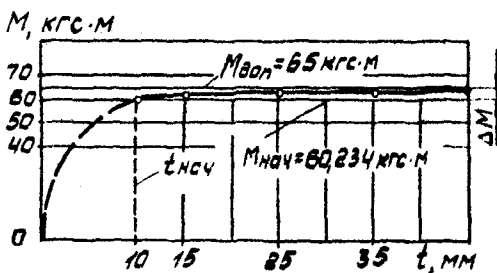


Рис. 4

ника 4 масло поступает на слив только через регулятор рабочей подачи 5. Происходит переход на максимальную рабочую подачу.

По мере врезания фрезы в заготовку увеличивается момент резания. При этом увеличивается также и реактивный момент на водиле динамометра, пропорциональный моменту на фрезе. Рычаг 7 водила динамометра, преодолевая усилие растяжения пружины 8, поворачивается на некоторый угол и перемещает плунжер регулятора 5 вниз, уменьшая величину подачи. Уменьшение подачи происходит до тех пор, пока момент резания не примет заданного значения. Задание величины момента производится изменением усилия пружины растяжения 8. Для гашения колебаний рычага 7 водила динамометра, вызванных неравномерностью процесса фрезерования, применен гидравлический демпфер 9. Демпфирование не должно быть чрезмерным, так как в ряде случаев система должна отрабатывать возмущения, вызванные биением зубьев фрезы.

По окончании процесса фрезерования обесточивается электромагнит воздухораспределителя 10 и поток сжатого воздуха направляется в пневмогидробак 6. Масло из бака 6 вытесняется в правую полость цилиндра 2 через золотник 4, выполняющий также функцию обратного клапана. Стол ускоренно возвращается в исходное положение.

Описанная система регулирования подачи обладает статической неравномерностью, т.к. имеется жесткая связь между положением плунжера регулятора 5 и рычагом водила динамометра 7. Следовательно, имеется однозначная связь между величиной момента на фрезе, пропорционального усилию натяжения пружины 8, и величиной подачи, пропорциональной площади f проходного сечения наклонных канавок плунжера регулятора 5.

Для определения точности стабилизируемой величины и получения зависимости между критерием оптимальности и статической неравномерностью необходимо иметь статическую характеристику системы.

Определение статической характеристики системы. Рассматриваемая система состоит из четырех звеньев: 1) регулируемого объекта - системы СПИД; 2) чувствительного элемента - балансирного редукторного динамометра с рычажным механизмом передачи сигнала; 3) преобразующего устройства - гидравлического регулятора рабочей подачи; 4) регулирующего органа - пневмогидравлического привода подачи. Статические характеристики звеньев системы описываются следующими уравнениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} M = 41,5 \cdot V^{0,212} \cdot S_z^{0,85} \cdot t^{0,933}; \end{array} \right. \quad (18)$$

$$0,148 M = C_1 \cdot L, H_{np} + \left(C_1 \frac{L_1^2}{L_2} + C_2 L_2 \right) (16 - m) - C_1 \frac{L_1^2}{L_2}; \quad (19)$$

$$f = z_k \cdot a m \sin \beta; \quad (20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} S_z = \frac{0,6 f}{n_\phi \cdot z_\phi \cdot F_{c1}} \sqrt{4,47 - 1,44 S_z^{0,73} \cdot t^{0,631}} \end{array} \right. \quad (21)$$

Определение величин z_k , a , m и β осуществлялось из условия обеспечения соответствующего расхода Q при граничных значениях подачи S_z . Величина предварительного натяжения H_{np} пружины определялась из уравнения (19) при том условии, чтобы при $t = 45$ мм значение момента было равно 65 кгс.м. Остальные значения величин, входящих в (19), (20) и (21), выбирались из конструктивных соображений.

Решая систему уравнений (18) - (21) с учетом соответствующих значений постоянных величин, получим зависимость, связывающую момент нагрузки и глубину фрезеруемого паз.

$$0,266 \frac{M^{2,236}}{t^{2,169}} = (520,7 - 15,34M + 0,113M^2) \left(4,47 - 0,031 \frac{M^{0,849}}{t^{0,161}} \right). \quad (22)$$

Зависимость (22) в неявном виде выражает статическую характеристику системы. Эта зависимость с помощью ЭВМ аппроксимирована степенной функцией:

$$M = 53,84 \cdot t^{0,049}. \quad (23)$$

Погрешность аппроксимации в рабочем диапазоне t не превышает $\pm 3,0\%$. Величину начального момента $M_{нач}$ на фрезе, а, следовательно, и глубину $t_{нач}$, при которой в работу вступает регулятор рабочей подачи, определим совместным решением уравнений статической характеристики (23) и основного ограничения (11). При $V = 44,3$ м/мин. и $S_z = 0,05$ мм/зуб получим $t_{нач} = 9,63 \approx 10$ мм.

Этому значению глубины паз соответствует $M_{нач} = 60,23$ кгс.м. Величина $M_{нач}$ зависит от предварительного натяжения H_{np} пружины растяжения δ и предварительного сжатия h_{np} пружины регулятора и их жесткости C_1 и C_2 .

Разность между величинами предельного и начального $M_0 = M_{нач}$ значения моментов определяет величину статической неравномерности

ΔM . На рис. 4 приведена зависимость $M = \varphi(t)$, построенная по уравнениям (II) и (23), из которой видно, что величина статической неравномерности определяет степень недоиспользования фрезы по нагрузке.

Анализ статической характеристики показал, что статическая неравномерность зависит от приведенной (суммарной) жесткости C_{np} пружин и угла наклона дроссельных канавок плунжера регулятора рабочей подечи. При проектировании САУ малая жесткость C_{np} приводит к увеличению начального растяжения пружины для обеспечения заданного усилия, соответствующего начальному моменту, т.е. увеличиваются габариты регулятора. Кроме того, уменьшение жесткости пружины приводит к ухудшению динамических характеристик регулятора. Исследования показали, что для работы фрезами шириной 1-3 мм приведенная жесткость пружин регулятора должна назначаться в пределах $0,6 \div 1,2$ кгс/см.

Для определения влияния статической неравномерности на приведенные затраты (4) выразим " K " как функцию глубины фрезеруемого паза t , для чего в (7) подставим зависимость S_z от t из (II) при $V = 44,3$ м/мин., $M = M_0 = 65$ кгс.м ($\Delta M = 0$):

$$K = 0,034 \cdot t^{0,085} \left[A + B \exp(22,074 t^{-0,789} + 3,067 t^{0,158} - 11,034) \right]. \quad (24)$$

Для определения зависимости $K(t)$ при наличии статической неравномерности регулирования подечи выразим S_z из (II) и (23) при $V = 44,3$ м/мин. и подставим полученное выражение в (7). В результате получим:

$$K = 0,042 t^{0,028} \left[A + B \exp(18,776 t^{-0,748} + 3,067 t^{0,158} - 11,034) \right]. \quad (25)$$

На рис. 5 сплошной линией нанесена зависимость $K(t)$ по выражению (24), пунктирной линией показана зависимость (25).

Из полученных зависимостей видно, что появление статической неравномерности вызывает увеличение приведенных затрат. Следовательно, при проектировании САУ необходимо уменьшать величину ΔM , зависящую от угла наклона β дросселирующих канавок и жесткости пружины регулятора, при сохранении хороших динамических свойств системы регулирования.

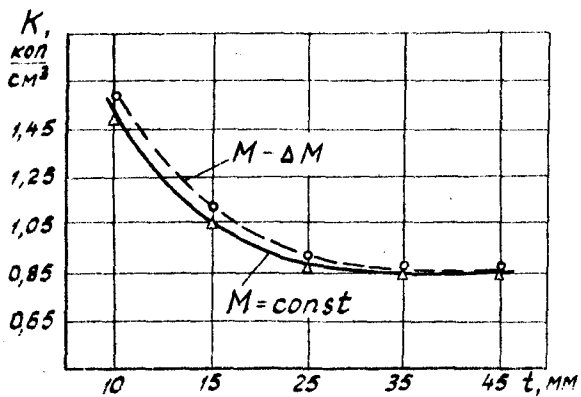


Рис. 5

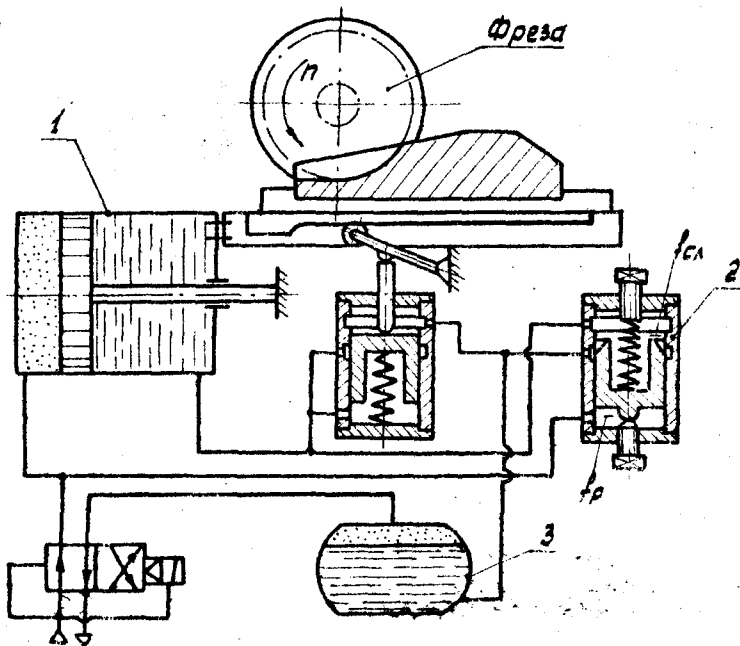


Рис. 6

Разработка принципиальной схемы САУ с контролем P_T . Проведенный ранее анализ показал, что для рассматриваемого случая обработки в качестве контролируемого параметра при создании САУ может быть принята и горизонтальная составляющая силы резания. Принципиальная схема такой системы приведена на рис. 6. Пневмогидравлический привод отличается от рассмотренного выше лишь способом регулирования скорости перемещения стола. В качестве источника информации об отклонениях P_T принято измерение давлений в полостях силового пневмогидроцилиндра. Основным преимуществом подобного способа получения информации о нагрузке является простота и надежность измерения.

При переходе с ускоренного перемещения на рабочую подачу весь поток масла из правой полости пневмогидроцилиндра вытесняется в бак 3 через регулятор рабочей подачи 2. При отсутствии силы резания разность давлений в полостях силового пневмогидроцилиндра I минимальна и плунжер регулятора 2 находится в крайнем нижнем положении, т.к. давления по обе стороны плунжера равны давлениям в соответствующих полостях пневмогидроцилиндра. По мере увеличения силы резания перепад давлений в полостях пневмогидроцилиндра увеличивается (главным образом за счет уменьшения давления в правой полости). Это приводит к некоторому смещению плунжера регулятора рабочей подачи 2 вверх и к уменьшению подачи. В дальнейшем рабочая подача будет изменяться таким образом, чтобы величина P_T поддерживалась постоянной. Поддерживаемая на заданном уровне P_T определяется степенью сжатия пружины регулятора 2 с помощью верхнего винта.

При малой глубине паза системе стабилизации P_T значительно увеличивает подачу стола. Это может вызвать недопустимое увеличение нагрузки на один зуб, т.к. число зубьев, участвующих в работе, уменьшается. Во избежание этого предусмотрено ограничение максимальной подачи с помощью нижнего винта регулятора 2.

Наличие пружины в регуляторе рабочей подачи, а также несоблюдения условия гидравлического подобия плунжера регулятора и поршня пневмогидроцилиндра вызывает появление статической неравномерности при регулировании подачи. Путем правильного выбора статической характеристики САУ можно добиться значительного повышения точности стабилизации значения P_T .

Статистическая характеристика САУ с контролем P_r . Получены уравнения для определения статических характеристик звеньев системы, которые позволяют определить статическую характеристику данной САУ:

$$P_r = 273,1 \cdot V^{0,205} \cdot S_z^{0,73} \cdot t^{0,531}; \quad (26)$$

$$P_{cл} = \frac{P_r \cdot t_p - C(h_{np} - m_{нач}) + \frac{C \cdot f}{z_k \cdot a \cdot S_{cл \cdot \beta}}}{f_{cл}}; \quad (27)$$

$$S_z = \frac{0,6 \cdot f}{\pi \cdot z_p \cdot F_{cл}} \sqrt{\frac{P_r \cdot t_p - \sum P_{тp} - P_r}{F_{cл}}}; \quad (28)$$

Экспериментальные исследования показали, что в рассматриваемом диапазоне подач сила трения изменяется незначительно, поэтому при построении статической характеристики САУ $\sum P_{тp}$ принималась постоянной.

Величине предварительного сжатия h_{np} пружины регулятора и начальная величина открытия канавок $m_{нач}$ должны обеспечить значение P_{r0} , соответствующее точке D на рис.2.

Решая систему уравнений (26)–(28) при найденных из этого условия значениях h_{np} и $m_{нач}$ получим:

$$0,025 \frac{P_r^{2,74}}{t^{1,73}} = (21904 - 177,6 P_r + 0,36 P_r^2) (4,47 - 0,0024 P_r); \quad (29)$$

Выражение (29), как и в первом случае, аппроксимировано степенной функцией:

$$P_r = 193,02 \cdot t^{0,055}; \quad (30)$$

Из совместного решения уравнений (12) и (30) при $V = 44,3$ м/мин. и $S_z = 0,05$ мм/зуб. получим $t_{нач} = 6,24$ мм и $P_{r_{нач}} = 213,48$ кгс. Разность между P_{r0} и $P_{r_{нач}}$ определяет величину статической неравномерности ΔP_r . Ее влияние на величину приведенных затрат определяется аналогично САУ с контролем момента резания.

Для рассматриваемой системы управления жесткость пружины, необходимая для обеспечения заданного значения P_{r0} при небольших габаритах регулятора, равна $0,1 + 0,3$ кгс/мм.

На рис.2. пунктирными линиями показано изменение подачи S_z от глубины паза t с учетом статической неравномерности ΔM и ΔP_r . Из рис. 2. видно, что рост статической неравномерности вызывает снижение величины рабочей подачи.

Проведенное аналитическое исследование позволило получить практические рекомендации для назначения основных конструктивных параметров систем управления.

IV. РАЗРАБОТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ВАРИАНТОВ САУ ПРОЦЕССОМ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПАЗОВ, ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований явились основой для создания систем автоматического управления процессом обработки глубоких пазов. Для рассмотренной выше операции фрезерования пазов первоначально была создана система управления с контролем момента на фрезе. Горизонтально-фрезерный станок модели 6М83Г, оснащенный этой системой, обеспечивает следующий цикл работы: быстрый подвод стола с заготовкой к фрезе, переход на максимальную рабочую подачу, фрезерования с постоянной величиной момента при автоматическом изменении подачи, быстрый отвод стола в исходное положение.

Непосредственное измерение момента резания в процессе обработки осуществляется с помощью малоинерционного редукторного динамометра планетарного типа, закрепленного на переднем конце шпинделя станка. Мощность выходного сигнала, снимаемого с динамометра, достаточна для работы системы без промежуточных усилителей.

Механический привод базового станка заменен более надежным пневмогидравлическим, управление скоростью которого ведется в зависимости от величины момента на фрезе. Пневмогидравлическая схема станка исключает влияние нагрева масла в пневмогидроприводе на стабильность настройки системы.

Производственными испытаниями доказаны основные преимущества фрезерования пазов шириной 3 мм и переменной глубиной от 10 до 46 мм с применением разработанной системы: исключение поломок фрез; значительное повышение стойкости инструмента; повышение производительности и снижение затрат на обработку; простота реализации автоматического цикла фрезерования; снижение затрат на эксплуатацию станков; улучшение условий для многостаночного обслуживания. Испытания показали надежность работы всех узлов системы. Разработанная САУ внедрена на Златоустовском машиностроительном заводе им. В.И. Ленина. В результате внедрения получены следующие технико-экономические показатели: повышение производительности в 1,3 раз; уменьшение расхода инструмента на 30%; уменьшение расхода на эксплуатацию станка на 30%; годовой экономический эффект составил 29.500 руб.

В дальнейшем была разработана вторая, более простая система управления подачей с контролем горизонтальной составляющей силы резания P_g . Эта система внедрена на девяти станках. Результаты внедрения: повышение производительности обработки в 1,5 раза; уменьшения расхода инструмента на 40%; годовой экономический эффект на один станок составил 1670 руб.

Для возможности применения САУ с контролем P_z на других операциях и повышения ее статической точности спроектирован и изготовлен усовершенствованный вариант этой системы. Отличительной особенностью ее является разделение пневматической и гидравлической сред и наличие мультипликатора, позволяющего развивать рабочее давление жидкости до 55 кгс/см^2 при давлении воздуха в сети 4 кгс/см^2 . Применение мультипликатора в системе позволяет уменьшить габариты силового пневмогидроцилиндра.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Для оптимизации процесса фрезерования глубоких пазов в качестве критерия оптимальности режима принята величина приведенных хозяйственных затрат предприятия. Математическим выражением критерия оптимальности является функция, выражающая средние за период стойкости инструмента затраты, приходящиеся на один см^3 удаленного при обработке материала.
2. Получены аналитические выражения для определения оптимальных параметров режима, обеспечивающих наименьшие приведенные затраты на обработку.
3. Крутящий момент от сил резания на зубьях фрезы, одновременно находящихся в работе, и сила резания, приходящаяся на один зуб фрезы, определяют основные ограничения на параметры режима.
4. На основе критерия оптимальности, стойкостной и силовых зависимостей разработан алгоритм оптимального управления процессом фрезерования глубоких пазов с учетом ограничения по нагрузке на инструмент.
5. Аналитическое исследование способов управления при выполнении конкретной операции фрезерования пазов показало, что для получения наименьших затрат на обработку необходимо применять систему с одним изменяющимся параметром S_z при постоянном значении скорости резания.

6. Разработана методика выбора и назначения величины контролируемого параметра нагрузки на фрезе при создании САУ процессом обработки пазов, исходя из условия получения наименьших затрат и надежной защиты инструмента от поломок. Для рассматриваемого случая обработки в качестве контролируемого параметра можно выбирать как крутящий момент, так и горизонтальную составляющую силы резания.
7. На основе полученного алгоритма управления и анализа силовых зависимостей разработаны принципиальные схемы САУ с контролем момента и горизонтальной составляющей силы резания. Разработаны и реализованы способом измерения этих параметров в процессе обработки.
8. Предложен инженерный метод исследования статической характеристики САУ, позволяющий определить основные конструктивные параметры системы и получить зависимость между критерием оптимальности и величиной статической неравномерности. Величина статической неравномерности определяет степень недоиспользования фрезы по нагрузке. Ее рост вызывает увеличение приведенных затрат на обработку.
9. Промышленные варианты САУ отличаются простотой конструктивного исполнения, высокой надежностью, малой стоимостью и могут быть установлены на любую модель горизонтально-фрезерного станка. В ходе производственных испытаний доказаны основные преимущества фрезерования пазов с применением разработанных САУ: надежное предохранение инструмента от поломок, повышение производительности и снижение затрат на обработку, повышение стойкости инструмента, сокращение расходов на эксплуатацию станков; простота практической реализации автоматического цикла фрезерования.
10. Системы автоматического управления внедрены на Златоустовском машиностроительном заводе им. В.И.Ленина на операции фрезерования глубоких пазов с годовым экономическим эффектом 29500 руб. и 15000 руб.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ
ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ
АВТОРА:

- I. Автоматическое регулирование подачи при фрезеровании узких и глубоких пазов. Отчет по теме 69/69. Госуд. Регистр. 69016734, июль.

- № Б I24027; инд. УДК 621.3.078. г. Челябинск, 1971. (М.М.Тверской)*
2. Фрезерование узких и глубоких пазов на станке с автоматическим регулированием подачи. "Вестник машиностроения". 1972, №II (М.М. Тверской).
 3. Фрезерование узких и глубоких пазов с автоматической стабилизацией нагрузки на инструмент. Тезисы докладов к научно-техническому совещанию "Повышение производительности металлорежущих станков и точности обработки путем применения адаптивных систем". ЛДНТП, Ленинград, 1973 г.
 4. Оптимизация режима обработки при фрезеровании узких и глубоких пазов. Сб. научных трудов ЧПИ "Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки". Челябинск, 1974, № I45 (М.М.Тверской).
 5. Станок для фрезерования пазов. Авторское свидетельство на изобретение № 402434. Бюллетень изобретений № 42, 1973, (М.М. Тверской, В.П.Клепиков).
 6. Фрезерование узких и глубоких пазов со стабилизированным значением момента. Сб. научных трудов ЧПИ "Совершенствование конструкций машин и методов обработки деталей", № I64, 1975, (М.М. Тверской).
 7. Определение зависимости стойкости инструмента от режима резания при фрезеровании узких и глубоких пазов. Там же.
 8. Выбор и назначение стабилизируемого параметра нагрузки на фрезе при создании САР подачи для обработки узких и глубоких пазов. Там же.
 9. Повышение производительности при фрезеровании узких и глубоких пазов с постоянной величиной крутящего момента на фрезе. Там же.