

05.02.08 (043)  
M236  
Министерство высшего и среднего специального  
образования СССР

Челябинский политехнический институт  
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

МАНОХИН Юрий Иванович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНУТРЕННЕГО ВРЕЗНОГО  
ШЛИФОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ОПТИМАЛЬНОГО  
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ

Специальность 05.02.08 - "Технология  
машиностроения"

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических  
наук

Челябинск  
1977

ЧПИ

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола и Кузбасском политехническом институте.

Научный руководитель — доктор технических наук  
ТВЕРСКОЙ М.М.

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
ЕВСЕЕВ Д.Г.  
кандидат технических наук  
КАНДАЛОВ М.И.

Ведущее предприятие — Челябинский завод тракторных агрегатов Челябинского производственного тракторостроительного объединения.


Автореферат разослан "14" июля 1977 г.

Защита диссертации состоится 16 июля 1977 г., 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, 44, проспект имени 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. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять в специализированный совет К-597/1 по указанному выше адресу.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
кандидат технических наук, доцент

 (В.М.МЕНЬШАКОВ)

Э

Актуальность работы. Предусмотренное директивами XXV съезда КПСС дальнейшее повышение требований к качеству и долговечности машин, внедрение высокопрочных, труднообрабатываемых материалов, совершенствование технологии производства заготовок повышают роль внутреннего шлифования как одного из видов отделочной обработки. Применение современных автоматизированных станков для внутреннего шлифования с запрограммированным циклом движений шлифовальной бабки, широко распространенных на заводах подшипниковой и автотракторной промышленности, поставило задачу их эффективного использования. Различие режущих свойств абразивного инструмента и припусков на обработку, изменение характеристик обрабатываемого материала и других параметров при обработке на таких станках приводит к неконтролируемым изменениям нагрузки на шлифовальный круг, что, в свою очередь, вызывает нестабильность выполняемого размера, геометрической формы и качества обработанной поверхности. Для достижения точностных и качественных показателей при внутреннем шлифовании в массовом и крупносерийном производстве применяются многоступенчатые автоматические циклы, включающие многократное выхаживание. Это значительно снижает производительность шлифования и далеко не всегда гарантирует отсутствие брака. Одним из путей повышения эффективности внутреннего шлифования является применение систем автоматического управления (САУ) режимом обработки. При этом важнейшей задачей при создании САУ является правильный выбор алгоритма оптимального управления процессом, который оказывает определяющее влияние на точность, производительность и эффективность процесса внутреннего шлифования с применением САУ. Создание таких систем должно основываться на методах современной математической теории оптимального управления, достижения которой не используются еще достаточно широко в технологии машиностроения. До настоящего времени выбор алгоритма управления процессом шлифования основывается, главным образом, на результатах экспериментальных исследований нескольких вариантов и на инженерной интуиции исследователей — в результате выбранный вариант не всегда оказывался лучшим.

Таким образом, одним из важнейших резервов повышения эффективности внутреннего врезного шлифования является совершенствование систем автоматического управления процессом. Создание таких систем, достаточно простых по конструкции и надежных в эксплуата-

ции, основанных на достижениях современной теории оптимального управления, является актуальной научной проблемой.

Целью работы является повышение эффективности внутреннего врезного шлифования путем отыскания оптимального алгоритма управления процессом и разработка на его основе системы автоматического управления.

Основные задачи: 1. Разработать и исследовать математическую модель процесса шлифования с регулируемым радиальным усилием.

2. Поставить и решить задачу оптимального управления внутренним врезным шлифованием, для чего: а) выбрать цель управления; б) сформулировать критерий оптимальности процесса; в) проанализировать ограничения, накладываемые, на выбор параметров процесса; г) разработать алгоритм оптимального управления режимом внутреннего врезного шлифования.

3. Произвести экспериментальные исследования внутреннего врезного шлифования с регулированием радиального усилия с целью выработки обоснованных рекомендаций по выбору основных параметров процесса.

4. Разработать на основе проведенного теоретического и экспериментального исследования эффективную систему автоматического управления процессом внутреннего врезного шлифования; провести производственные испытания и внедрение разработанной системы.

Научная новизна. Впервые поставлена задача разработки алгоритма оптимального управления процессом внутреннего врезного шлифования, который имеет целью снятие заданного припуска, исправление исходной погрешности заготовки и достижение требуемого качества обработанной поверхности при обеспечении экстремума выбранного критерия оптимальности.

Оптимизация проведена на основе интегрального критерия оптимальности, который учитывает изменяющиеся условия процесса шлифования, протекающего во времени, и отражает переменную, зависящую от режима, часть приведенных хозрасчетных затрат предприятия на данную операцию.

Создана математическая модель процесса внутреннего врезного шлифования в виде системы дифференциальных уравнений, которые связывают скорость съема припуска, текущую величину погрешности заготовки и скорость ее исправления с управляющими параметрами.

Разработка алгоритма оптимального управления внутренним врезным шлифованием, предусматривающего получение заданных точностных и качественных показателей процесса, впервые проведена на основе

принципа максимума Понтрягина. С целью практической реализации предложен квазиоптимальный алгоритм управления процессом.

По результатам теоретического и экспериментального исследований создана САУ процессом внутреннего врезного шлифования; разработана методика для определения ее конструктивных параметров.

Практическая полезность. Спроектирован и внедрен в производство промышленный вариант САУ процессом внутреннего врезного шлифования. Внедрение САУ позволило повысить производительность обработки в 1,5 ... 1,6 раза, обеспечить стабильное получение 2-го класса точности обрабатываемого отверстия без непосредственного контроля размера, надежное выполнение технических требований. Разработанный вариант САУ достаточно прост и надёжен в эксплуатации и с успехом может быть использован как при модернизации существующих, так и при создании новых внутришлифовальных станков. Результаты теоретического и экспериментального исследований могут быть применены при создании САУ для аналогичных операций.

Реализация работы в промышленности. Промышленный вариант системы автоматического управления процессом шлифования посадочного отверстия и базового торца шестерен на внутришлифовальных станках внедрен на Челябинском заводе тракторных агрегатов с годовым экономическим эффектом 62.000 рублей. Внедрение разработанной на основе оптимального алгоритма САУ процессом внутреннего врезного шлифования на ГПЗ-14 позволило повысить производительность обработки в 1,2 ... 1,4 раза при стабильном качестве шлифуемой поверхности. Годовой экономический эффект от внедрения - 1250 рублей на один станок.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации автором докладывались:

1. На областной научно-технической конференции "Резервы роста производительности труда на предприятиях Кузбасса", Кемерово, 1972.
2. На Всесоюзном совещании-семинаре "Повышение производительности металлорежущих станков и точности обработки путем применения адаптивных систем", Л., 1973.
3. На Западно-Сибирской Региональной конференции молодых ученых "Радиоэлектроника и управление", Томск, 1974.
4. На научно-технических конференциях в Челябинском политехническом институте им. Ленинского комсомола в 1976-1976 г.г.

5. На 6 Всесоюзном совещании по автоматизации процессов машиностроения, М., 1976.

По материалам диссертации автором опубликовано девять печатных работ.

Объем работы, ее структура. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения; изложена на 150 страницах машинописного текста. Список использованной литературы включает в себя 103 источника. В диссертационной работе имеется 54 иллюстрации, 8 таблиц и 6 приложений.

#### ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$y_{шд}(t)$ ;  $\dot{y}_{шд}(t)$ ;  $\ddot{y}_{шд}(t)$  - соответственно, координата режущей кромки шлифовального круга при отсутствии упругих деформаций в системе СПИД; её первая и вторая производные по времени;

$y_a(t)$ ;  $\dot{y}_a(t)$ ;  $\ddot{y}_a(t)$  - соответственно, координата режущей кромки шлифовального круга в текущий момент времени, её первая и вторая производные по времени;

$y_a(t-t_0)$ ;  $\dot{y}_a(t-t_0)$ ;  $\ddot{y}_a(t-t_0)$  - соответственно, координата режущей кромки шлифовального круга на предшествующем обороте заготовки в момент времени  $(t-t_0)$ ; её первая и вторая производные по времени;

$t$  - текущее время в пределах  $i$ -го оборота, с;

$t_0$  - время одного оборота заготовки, с;

$j$  - жесткость системы СПИД, кгс/мм;

$M$  - масса шлифовальной бабки, кгс с<sup>2</sup>/мм;

$\Gamma$  - коэффициент пропорциональности, равный отношению глубины шлифования к величине радиального усилия при данных условиях обработки, мм/кгс;

$\omega$  - угловая скорость вращения заготовки, с<sup>-1</sup>;

$\varphi_0$  - начальная фаза, рад;

$\frac{dy}{dt}$ ;  $\frac{dz}{dt}$  - соответственно, скорость исправления исходной погрешности и скорость съема припуска, мм/мин;

$\tau_m$  - машинное время, мин;

$E$  - приведенные козрасчетные затраты предприятия, обусловленные одной минутой работы станка и рабочего, без учета затрат на инструмент, коп/мин;

$E_k$  - приведенные козрасчетные затраты предприятия на эксплуатацию шлифовального круга, включая затраты на правящий инструмент, расходуемый при всех правках одного круга, коп;

- $\tau_{сн}$  — время на смену круга, предварительную его правку и настройку на размер, мин;  
 $N_d$  — число деталей, обработанных одним кругом, шт;  
 $H_k$ ;  $D_{кmax}$ ;  $D_{кmin}$  — соответственно, высота круга, его максимальный и минимальный диаметры, мм;  
 $K_1$  — коэффициент, учитывающий расход круга при правках;  
 $Q_a = \frac{d\Delta}{dt}$  — интенсивность расхода абразива при шлифовании, мм<sup>3</sup>/мин;  
 $\Delta_1$  — величина израсходованного объема абразива при шлифовании одной детали, мм;  
 $C_{ик}$ ;  $m$ ;  $C_u$  — постоянные коэффициенты, зависящие от условий обработки;  

$$b_1 = \frac{4C_{ик}(E_k + C_{сн}E)}{\pi H_k (D_{кmax}^2 - D_{кmin}^2) K_1}; \quad b_2 = \Gamma n_a; \quad b_3 = n_a; \quad b_4 = [j - M\omega]^2; \quad b_5 = \omega^2; \quad b_6 = [j - M\omega^2(1 + \Gamma j)]^2;$$

$$b_7 = \omega^2(1 + \Gamma)^2; \quad b_8 = 0,5\omega j;$$
 $n_a$  — частота вращения заготовки, об/с;  
 $Z_3$  — заданная величина припуска на обработку; мм;  
 $z(\tau)$  — линейный съём металла за время  $\tau$ , мм;  
 $P_{max}$  — допустимая мгновенная нагрузка на инструмент, кгс;  
 $d_{max}$ ;  $d_{min}$  — максимальная и минимальная степени демпфирования привода подачи, кгс/см;  
 $\delta_k$ ;  $\delta_k$  — исходная и конечная погрешности формы и (или) положения отверстия, мм;  
 $Z_{уст}$  — величина припуска, снимаемого на заключительном этапе цикла обработки, мм;  
 $\Delta F$  — разность между рабочими площадями гидроцилиндров привода подачи, см<sup>2</sup>;  
 $F_{1ц}$  — рабочая площадь гидроцилиндра подачи, см<sup>2</sup>.

## I. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ВНУТРЕННЕГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ КАК ОБЪЕКТ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

### Составление и исследование математической модели процесса.

Проведенный анализ работ по автоматическому управлению процессом шлифования показал, что в случае внутреннего врезного шлифования наиболее просто реализовать САУ радиальным усилием шлифования путем регулирования поперечной подачи. С целью исключения копирования исходной погрешности в процессе шлифования необходимо обеспечить повышенный съём припуска с "выступов" обрабатываемой поверхности за счет соответствующего изменения радиального усилия. Одним из путей формирования необходимого закона изменения радиального

усилия за один оборот заготовки является применение дополнительно-го демпфирования привода поперечной подачи. В этом случае интенсивность исправления погрешности формы и положения отверстия определяется, главным образом, степенью демпфирования.

Для получения математической модели процесса внутреннего шлифования с регулируемым радиальным усилием  $P_y$  запишем уравнение движения шлифовальной бабки массой  $M$  под действием приложенного к ней усилия  $P$  :

$$M\ddot{y}_{ws}(t) + d\dot{y}_{ws}(t) + P_y = P. \quad (I)$$

Принимая, что радиальное усилие шлифования  $P_y$  пропорционально мгновенной глубине шлифования и упругому перемещению системы СПИД, можно записать:

$$\frac{1}{r} [y_a(t) - y_a(t-t_0)] - j [y_{ws}(t) - y_a(t)] = P_y. \quad (2)$$

Подставив выражение (2) в (I), после преобразования получим уравнение, связывающее координаты режущей кромки шлифовального круга на данном и предыдущем оборотах заготовки:

$$\ddot{y}_a(t) + \frac{d}{M} \dot{y}_a(t) + \frac{j}{M(1+j)} y_a(t) = \frac{P\Gamma j}{M(1+j)} + \frac{1}{(1+j)} \ddot{y}(t-t_0) + \frac{d}{M(1+j)} \dot{y}_a(t-t_0) + \frac{j}{M(1+j)} y_a(t-t_0). \quad (3)$$

Уравнение (3) записано в предположении непрерывности контакта шлифовального круга с шлифуемой поверхностью. Данное уравнение относится к дифференциальным уравнениям с запаздывающим аргументом. Задавая исходный профиль заготовки (рассматривается случай, когда заготовка имеет некоторый эксцентриситет  $a$ ) в виде:  $y_{a,исх}(t) = a \sin(\omega t + \varphi_0)$  и подставив  $y_{a,исх}(t)$  и его производные в правую часть уравнения (3), после приведения подобных членов получим:

$$\ddot{y}_a(t) + \frac{d}{M} \dot{y}_a(t) + \frac{j}{M(1+j)} y_a(t) = \frac{P\Gamma j}{M(1+j)} + \left\{ \left[ \frac{aj}{M(1+j)} - \frac{a\omega^2}{(1+j)} \right] \sin(\omega t + \varphi_0) + \frac{ad\omega}{M(1+j)} \cos(\omega t + \varphi_0) \right\}, \quad 0 \leq t \leq t_0. \quad (4)$$

При величине демпфирования  $d > 2\sqrt{\frac{Mj}{1+j}}$  (это обычно имеет место для реального процесса внутреннего шлифования) решение уравнения (4) найдем в виде:

$$y_a(t) = P\Gamma + A\alpha \sin(\omega t + \varphi_0 + \psi) + C_1 e^{-\tau t},$$

где  $A$  — коэффициент исправления исходной погрешности, равный отношению погрешностей на данном  $v(t)$  и предыдущем  $v(t-t_0)$  оборотах заготовки; вычисляется по формуле:



$$A = \frac{v(t)}{v(t-t_0)} = \sqrt{\frac{b_4 + b_5 d^2(t)}{b_6 + b_7 d^2(t)}}; \quad (5)$$

$C_{ii}$  - постоянная интегрирования;  $\psi$  - смещение по фазе;

$$\tau_i = -\frac{d}{2M} + \sqrt{\frac{d^2}{4M} - \frac{1}{M(1+\Gamma_j)}}.$$

Для получения координаты обрабатываемой поверхности на втором обороте необходимо подставить полученное значение  $y_0(t)$ , и её производные в правую часть уравнения (3) и решить его. Поступая аналогичным образом  $i$  раз, запишем выражение для координаты обрабатываемой поверхности на  $i$ -м обороте:

$$y_0(t)_i = i\Gamma - c_{yi} e^{\tau_i t} + d A^i [\sin(\omega t + \varphi_0 + i\psi) - c_{vi} e^{\tau_i t}]; \quad (i-1)t_0 \leq t \leq it_0, \quad (6)$$

где  $c_{yi} = \rho\Gamma \sum_{n=1}^i e^{(n-1)\tau_i t_0}$ ;  $c_{vi} = \sin(\varphi_0 + i\psi) e^{-\tau_i t_0} - (1 - e^{-\tau_i t_0}) \sum_{n=1}^i \frac{\sin(n\psi + \varphi_0)}{A^{i-n}} e^{-(i-n-1)\tau_i t_0}$ .

Полученное выражение позволяет оценить процесс исправления исходной погрешности и нарастание съема металла в зависимости от приложенной к шлифовальной бабке силы и степени демпфирования привода подачи.

Построение математической модели процесса внутреннего врезного шлифования предполагает получение зависимостей типа:

$$\frac{d\delta}{d\tau} = f_1(u_1, u_2, \dots, u_n); \quad \frac{dz}{d\tau} = f_2(u_1, u_2, \dots, u_n), \quad (7)$$

где  $u_1, u_2, \dots, u_n$  - управляющие параметры.

Анализ выражения (6) показывает, что величина текущей погрешности на  $i$ -м обороте заготовки может быть представлена в виде:

$$\bar{v}_i = 2\alpha A^i + c_{vi} \alpha A^i e^{\tau_i \left(\frac{\pi}{2\omega} - \frac{i\psi}{\omega}\right)} (1 - e^{-\frac{\tau_i \pi}{\omega}}). \quad (8)$$

Записав по аналогии выражение для величины текущей погрешности на  $i$ -ом обороте и вычитая из него выражение (8), найдем величину исправления погрешности отверстия за  $i$  оборот заготовки:

$$\Delta \bar{v} = \bar{v}_{i+1} - \bar{v}_i = 2\alpha A^i (A-1) + \alpha A (1 - e^{-\frac{\tau_i \pi}{\omega}}) (A c_{v_{i+1}} - c_{v_i}) e^{\tau_i \left(\frac{\pi}{2\omega} - \frac{i\psi}{\omega}\right)}. \quad (9)$$

Для получения зависимости вида (7а) введем новый аргумент  $\tau$ , имеющий размерность времени, по формуле  $\tau = it_0$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, k$ . Введем также новую переменную  $\delta(\tau)$ , зависящую от аргумента  $\tau$  по формуле:  $\delta(\tau) = v\left(\frac{\tau}{t_0}\right) - v_i$ . Разделив обе части выражения (9) на  $t_0$  и перейдя к новым переменным, запишем:

$$\frac{\delta(\tau+t_0) - \delta(\tau)}{t_0} = 2\alpha A^{\frac{\tau}{t_0}} n_0(A-1) + \alpha A^{\frac{\tau}{t_0}} n_0 \left(1 - e^{-\frac{\tau}{t_0}}\right) \left[ A c_{\delta(\tau+t_0)} e^{-\frac{\tau}{t_0}} - c_{\delta(\tau)} \right] e^{-\tau \left[ \frac{1}{2t_0} - \frac{\tau}{t_0 \omega} \right]}$$

Здесь в левой части стоит выражение, имеющее своим пределом при  $t_0 \rightarrow 0$  производную  $\frac{d\delta}{d\tau}$  :

$$\frac{d\delta}{d\tau} = 2\alpha A^{\frac{\tau}{t_0}} n_0(A-1) + \alpha A^{\frac{\tau}{t_0}} n_0 \left(1 - e^{-\frac{\tau}{t_0}}\right) \left[ A c_{\delta(\tau+t_0)} e^{-\frac{\tau}{t_0}} - c_{\delta(\tau)} \right] e^{-\tau \left[ \frac{1}{2t_0} - \frac{\tau}{t_0 \omega} \right]}$$

Проведенный анализ показал, что второе слагаемое в правой части полученного выражения, описывающее переходный процесс, незначительно влияет на величину  $\frac{d\delta}{d\tau}$ , поэтому для практических расчетов может быть использована формула:

$$\frac{d\delta}{d\tau} = b_3 \delta(\tau) \left[ \sqrt{\frac{b_4 + b_5 d_2(\tau)}{b_6 + b_7 d_2(\tau)}} - 1 \right], \quad (10)$$

где  $\delta(\tau) = 2\alpha A^{\frac{\tau}{t_0}}$ ,  $A$  определяется из выражения (5).

Зависимость скорости съема припуска от управляющих параметров может быть найдена на основе выражения (2). Действительно, выражение, стоящее в квадратных скобках правой части (2), есть приращение съема металла за один оборот заготовки  $\Delta z$ . Разделив  $\Delta z$  на  $t_0$ , можно записать  $\frac{\Delta z}{t_0} = b_2 \bar{P}_y$ . Переходя к пределу при  $t_0 \rightarrow 0$ , получим зависимость скорости съема припуска от радиального усилия шлифования:

$$\frac{dz}{d\tau} = b_2 \bar{P}_y(\tau). \quad (11)$$

Уравнения (10) и (11) связывают скорость съема припуска, текущую величину погрешности и скорость ее исправления с управляющими параметрами, в качестве которых принята усредненная за оборот заготовки величина радиального усилия  $\bar{P}_y(\tau)$  и степень демпфирования  $d(\tau)$  привода поперечной подачи. Ошибка, возникающая при переходе от дискретного (пооборотного) описания процесса (6) к выражениям (10) и (11), незначительна, так как время одного оборота заготовки мало по сравнению с временем шлифования.

Как видно из выражения (10), скорость исправления исходной погрешности является функцией коэффициента  $A$ . Для нахождения параметров системы СПИД:  $d, \omega, \Gamma, j$  и  $M$ , обеспечивающих наилучшее исправление погрешности, решим задачу минимизации функции  $A_1 = f(d, \omega, \Gamma, j, M)$ , где  $A_1 = A^{2\omega}$ . При этом для сравнения между собой процессов шлифования, осуществляемых за одно и то же время  $t = 4\pi$ , с при разных значениях угловой скорости  $\omega$ , коэффициент  $A$  возведен в степень  $n_1 = n_2 t = 4\pi n_2 = 2\omega$  (здесь принято:  $n_1$  - число оборотов заготовки за время  $t_1$ ). На параметры  $d, \omega, \Gamma, j$  и  $M$  наложены верхние и нижние ограничения, исходя из возможностей реализации. Решение данной многомерной задачи минимизации нелинейной функции с линейными ограниче-

ниями, проведенное методом возможных направлений с использованием ЭВМ "Наури-К", показывает, что минимум функции  $A$ , а следовательно и наиболее быстрое исправление исходной погрешности обеспечивается при максимальных значениях указанных параметров.

Выбор критерия оптимальности. В настоящее время общепринятым критерием эффективности обработки на металлорежущих станках является величина приведенных затрат предприятия на выполнение конкретной операции. Переменную, зависящую от режима, часть приведенных затрат на операцию можно записать следующим образом:

$$C_{03} = \tau_M E + \frac{E_k + \tau_{\text{сн}} E}{N_3} \quad (12)$$

Величину  $N_3$  можно определить по формуле:  $N_3 = \frac{\Delta_{\Sigma}}{\Delta_1}$ , где полезно используемый объем шлифовального круга  $\Delta_{\Sigma}$  находится как разность объемов круга перед началом работы и при его замене за вычетом потерь на правку:

$$\Delta_{\Sigma} = \frac{\pi H_k}{4} (D_{\text{кmax}}^2 - D_{\text{кmin}}^2) K_1 \quad (13)$$

Для определения величины израсходованного объема абразива при шлифовании одной детали  $\Delta_1$  используем зависимость:  $Q_a = c_{\text{ук}} \bar{P}_y^m(\tau)$ . Так как  $Q_a = \frac{d\Delta_1}{d\tau}$ , величина  $\Delta_1$  может быть определена по формуле:

$$\Delta_1 = \int_0^{\tau_M} c_{\text{ук}} \bar{P}_y^m(\tau) d\tau \quad (14)$$

Подставив выражения (13) и (14) в (12), получим выражение для критерия оптимальности в виде функционала:

$$C_{03} = \tau_M E + b_1 \int_0^{\tau_M} \bar{P}_y^m(\tau) d\tau \quad (15)$$

Анализ ограничений, накладываемых на выбор управляющих параметров. При оптимизации процесса внутреннего врезного шлифования необходимо стремиться не только к минимизации выбранного критерия оптимальности, но и к обеспечению ограничений, наложенных на процесс показателями качества обработки, конструкцией станка и возможностями абразивного инструмента. Одним из важнейших является ограничение по глубине дефектного слоя и величине шероховатости обрабатываемой поверхности, которое может быть записано в виде:

$$P_y(\tau) \leq c_n [z_s - z(\tau)] + \bar{P}_{yк} \quad (16)$$

где значение радиального усилия  $\bar{P}_{yк}$ , выбранное из условия получения требуемой шероховатости поверхности, должно удовлетворять условию:  $\bar{P}_{yк} < \bar{P}_{yn}$ ;  $\bar{P}_{yn}$  - значение радиального усилия, при котором отсутствуют прижоги.

При шлифовании "выступов" обрабатываемой поверхности при большой величине исходной погрешности круг подвергается действию мгновенных перегрузок, которые вызывают местное осыпание шлифовального круга, появление глубоких, неустраняемых при дальнейшей обработке прижогов шлифуемой поверхности. Математическое выражение ограничения по мгновенным перегрузкам может быть представлено в виде:

$$\bar{P}_y(\tau) \leq P_{\max} - 0,5 \Delta P_y [\delta(\tau), d(\tau)], \quad (17)$$

где амплитуда колебания радиального усилия за один оборот заготовки:

$$\Delta P_y [\delta(\tau), d(\tau)] = \frac{b_s \delta(\tau) d(\tau)}{\sqrt{b_s + b_c d^2(\tau)}}.$$

Другие ограничения, определяемые возможностями станка, например, на величину степени демпфирования, можно записать в виде:

$$d(\tau) \leq d_{\max}; \quad d(\tau) > d_{\min}. \quad (18a, б)$$

Экспериментальное исследование процесса шлифования с контролируемым радиальным усилием. Для экспериментального исследования на базе внутришлифовального полуавтомата ЛЗ-154 создана установка с гидравлическим приводом подачи. Для контроля величины снимаемого припуска в процессе шлифования разработано контрольное приспособление. Обработывались внутренние кольца подшипника № 312 кругом ПП60х50х20 24А40-Н СМ2 К6 со скоростью 37 м/с при скорости детали 71,5 м/мин и 70 двойных ходов стола в минуту.

Первая часть исследования проводилась с целью экспериментального подтверждения построенной математической модели процесса; определения неизвестных параметров, используемых при построении модели - величин  $b_z$  и  $\Gamma$ , а также определения зависимости линейной скорости износа круга  $V_{\text{ук}}$  и глубины структурных превращений (глубины прижога  $h$ ) обрабатываемой поверхности от радиального усилия шлифования. В результате математической обработки результатов экспериментов были получены следующие зависимости:

$$\frac{dz}{d\tau} = 0,0205 \bar{P}_y, \text{ мм/мин}; \quad V_{\text{ук}} = 11,2 \cdot 10^{-5} \bar{P}_y^{2,3}, \text{ мм/мин}; \quad \Gamma(\omega) = \frac{0,00213}{\omega}, \text{ мм/кгс}; \quad h = 0,0121 \bar{P}_y - 0,15, \text{ мм}$$

Вторая часть экспериментальной работы посвящена исследованию влияния степени демпфирования привода подачи и радиального усилия шлифования на процесс исправления исходной погрешности. Для уменьшения числа экспериментов был использован математический метод планирования эксперимента. В результате экспериментальных исследований качественно и количественно подтверждены теоретические выводы о влиянии указанных параметров на скорость исправления погрешности. В частности, показано, что наилучшее исправление достигается при максимальной степени демпфирования.

## П. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВНУТРЕННЕГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Экспериментальное и теоретическое исследование влияния степени демпфирования на процесс исправления исходной погрешности показало, что наивысшая скорость исправления достигается при максимальной степени демпфирования привода подачи. Тем не менее, степень демпфирования нельзя все время шлифования поддерживать на максимальном уровне. Действительно, при поддержании максимальной степени демпфирования в начале процесса шлифования вследствие больших величин погрешности формы и положения отверстия круг будет испытывать мгновенные перегрузки. Чтобы исключить данное явление, необходимо снизить степень демпфирования, т.е. уменьшить размах колебаний  $\Delta P_y$  радиального усилия (см. (17)). Уменьшение степени демпфирования, в свою очередь, вызывает замедление процесса исправления погрешности, появляется опасность снятия заданного припуска на обработку без получения заданной точности формы и расположения отверстия готовой детали. С другой стороны, устранения мгновенных перегрузок можно достигнуть снижением усредненного радиального усилия, однако, в этом случае уменьшится производительность обработки. Несмотря на уменьшение расхода абразива, приведенные затраты на обработку детали могут увеличиться.

Изложенное выше свидетельствует о необходимости оптимального управления рассматриваемым процессом. Задачу оптимального управления режимом обработки при внутреннем врезном шлифовании можно сформулировать следующим образом: необходимо найти такие законы изменения радиального усилия шлифования и степени демпфирования, которые обеспечивают, с учетом накладываемых ограничений (16), (17) и (18а,б), минимум приведенных затрат на операцию, определяемых функционалом (15). При этом время шлифования не задано, а определяется выражениями (10), (11) при следующих граничных условиях:

$$z_{\tau=0} = 0; \quad z_{\tau=\tau_n} = z_3; \quad \delta'_{\tau=0} = \delta'_n; \quad \delta'_{\tau=\tau_n} = \delta'_k.$$

Наличие ограничений на управляющие параметры приводит к необходимости использования для решения данной задачи принципа максимума Понтрягина. Согласно принципу максимума оптимальное управление должно доставлять максимальное значение функции Гамильтона:

$$H_1 = -E - b_1 \bar{P}_y^m(\tau) + \psi_1 b_2 \bar{P}_y(\tau) + \psi_2 b_3 \delta'(\tau) \left[ \sqrt{\frac{b_4 + b_5 d^2(\tau)}{b_6 + b_7 d^2(\tau)}} - 1 \right] - \mu_1 \left[ \bar{P}_y(\tau) - P_{max} + \right. \quad (2I) \\ \left. + \frac{b_8 \delta(\tau) d(\tau)}{\sqrt{b_4 + b_5 d^2(\tau)}} \right] - \mu_2 \left\{ \bar{P}_y(\tau) - c_n [z_3 - z(\tau)] - \bar{P}_{yк} \right\} + \mu_3 [d(\tau) - d_{min}] - \mu_4 [d(\tau) - d_{max}].$$

$$\text{Здесь } \begin{cases} \mu_1 \begin{cases} > 0 \text{ при } \bar{P}_y(\tau) = P_{\max} - \frac{b_2 \delta(\tau) d(\tau)}{\sqrt{b_4 + b_5 d^2(\tau)}}; \\ = 0 \text{ при } \bar{P}_y(\tau) < P_{\max} - \frac{b_2 \delta(\tau) d(\tau)}{\sqrt{b_4 + b_5 d^2(\tau)}}; \end{cases} \\ \mu_2 \begin{cases} > 0 \text{ при } \bar{P}_y(\tau) = C_n [z_3 - z(\tau)] + \bar{P}_{yк}; \\ = 0 \text{ при } \bar{P}_y(\tau) < C_n [z_3 - z(\tau)] + \bar{P}_{yк}; \end{cases} \end{cases} \quad \begin{cases} \mu_3 \begin{cases} > 0 \text{ при } d(\tau) = d_{\min} \\ = 0 \text{ при } d(\tau) > d_{\min} \end{cases} \\ \mu_4 \begin{cases} > 0 \text{ при } d(\tau) = d_{\max} \\ = 0 \text{ при } d(\tau) < d_{\max} \end{cases} \end{cases}$$

Уравнения для определения вспомогательных переменных  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  имеют вид:

$$\frac{d\Psi_1}{d\tau} = -\frac{\partial H_1}{\partial z} = -\mu_2 C_n; \quad \frac{d\Psi_2}{d\tau} = -\frac{\partial H_1}{\partial \delta} = -\Psi_3 b_3 \left[ \sqrt{\frac{b_4 + b_5 d^2(\tau)}{b_6 + b_7 d^2(\tau)}} - 1 \right] + \frac{\mu_1 b_3 d(\tau)}{\sqrt{b_4 + b_5 d^2(\tau)}}. \quad (22a, б)$$

Управления  $\bar{P}_y(\tau)$  и  $d(\tau)$  определяются из необходимых условий:

$$\frac{\partial H_1}{\partial \bar{P}_y} = 0; \quad \frac{\partial H_1}{\partial d} = 0. \quad (23a, б)$$

Используя для нахождения оптимального управления метод сопряжения граничных и свободных участков решения, найдем (результаты приведены для операции шлифования посадочных отверстий внутреннего кольца подшипника №312), что на начальном участке (см. рис. I, кривая Ia, участок I) оптимального цикла закон изменения радиального усилия определяется выражением:

$$\bar{P}_y(\tau) = P_{\max} - 0,5 \Delta P_y [\delta(\tau), d(\tau)]. \quad (24)$$

Закон изменения степени демпфирования (кривая I на рис. I) определяется решением системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Psi_2}{\partial \tau} = -\frac{\partial H_1}{\partial \delta}; \quad \bar{P}_y(\tau) = P_{\max} - 0,5 \Delta P_y [\delta(\tau), d(\tau)]; \\ \mu_1 = \Psi_1 b_2 - m b_1 \bar{P}_y^{(m-1)}(\tau); \quad \frac{\partial H_1}{\partial d} = 0 \quad (\mu_3 = \mu_4 = 0). \end{cases} \quad (25)$$

Далее, на втором участке цикла (участок II) усредненная за один оборот заготовки величина радиального усилия поддерживается на постоянном уровне, обеспечивающем минимальные суммарные затраты на инструмент и машинное время. В конце цикла, на участке чистового шлифования (участок III), закон изменения радиального усилия следует ограничению (16):

$$\bar{P}_y(\tau) = C_n [z_3 - z(\tau)] + \bar{P}_{yк}. \quad (26)$$

Степень демпфирования на втором и заключительном участках цикла должна поддерживаться на максимальном уровне, т.е.  $d = d_{\max}$ , обеспечивающем быстрое исправление исходной погрешности. Границы участков цикла определяются конкретным сочетанием величин допуска и исходной погрешности. Чтобы оценить возможные изменения оптималь-

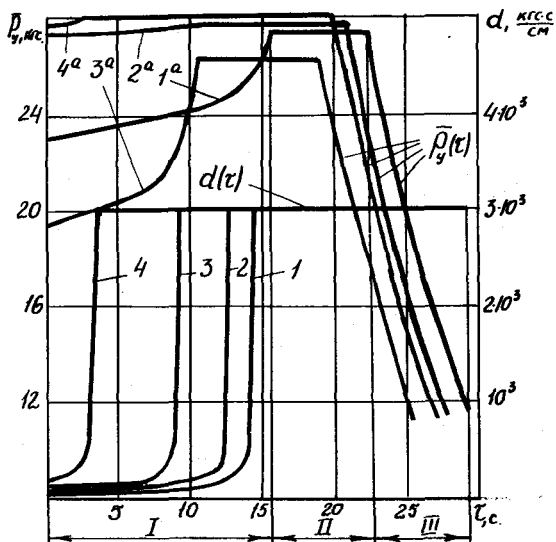


Рис. 1. Оптимальные законы изменения управляющих параметров. 1, 1<sup>а</sup> -  $Z_3 = 0,25 \text{ мм}$ ,  $\delta_n = 0,2 \text{ мм}$ ; 2, 2<sup>а</sup> -  $Z_3 = 0,25 \text{ мм}$ ,  $\delta_n = 0,15 \text{ мм}$ ; 3, 3<sup>а</sup> -  $Z_3 = 0,2 \text{ мм}$ ,  $\delta_n = 0,2 \text{ мм}$ ; 4, 4<sup>а</sup> -  $Z_3 = 0,25 \text{ мм}$ ,  $\delta_n = 0,1 \text{ мм}$

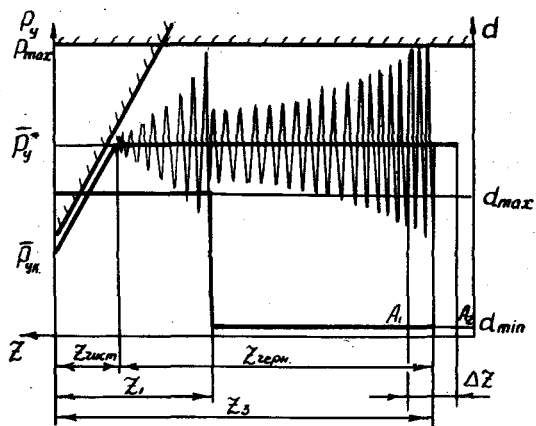


Рис. 2. Реализованный алгоритм управления процессом

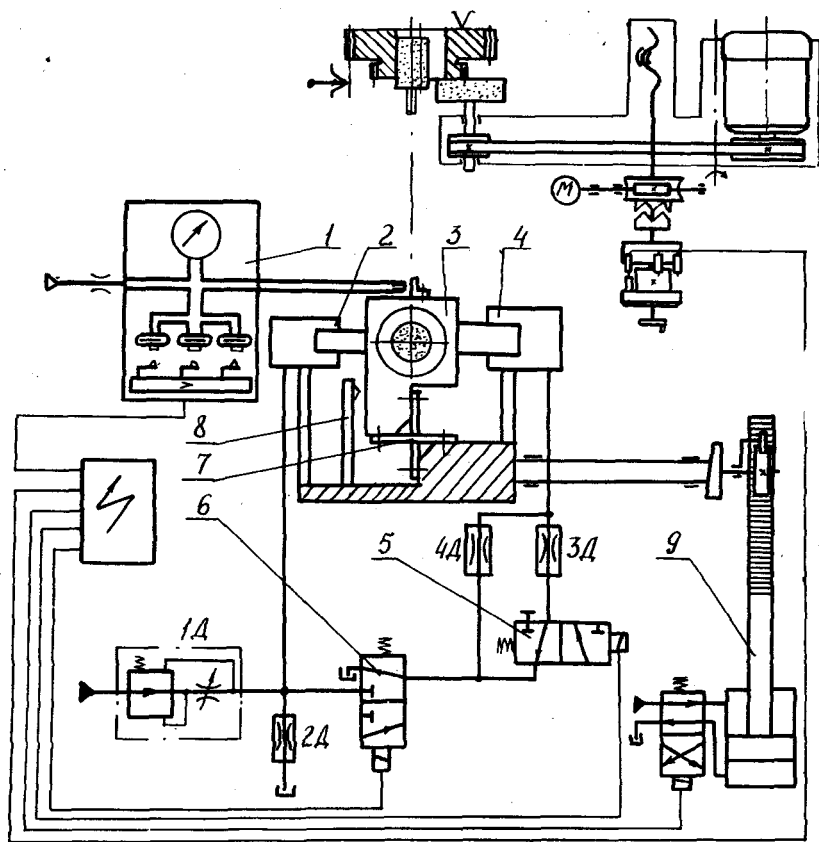


Рис.3. Гидрокинематическая схема САУ



ного закона управления, было произведено решение задачи оптимизации для различных величин снимаемого припуска и исходной погрешности заготовки (кривые 2, 2а, 3, 3а, 4, 4а на рис.1).

### Ш. РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ САУ ПРОЦЕССОМ ВНУТРЕННЕГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

#### Выбор алгоритма управления процессом с учетом реализации.

Реализация полученного выше оптимального алгоритма связана прежде всего с созданием САУ радиальным усилием шлифования и степенью демпфирования. При этом для успешной реализации алгоритма (в частности, это касается I и Ш этапов цикла) необходимо применение сложной управляющей аппаратуры. При решении практических задач целесообразным представляется нахождение приближенного решения, более простого для технической реализации и незначительно, в смысле выбранного критерия, отличающегося от строго оптимального. Реализованный алгоритм приведен на рис.2. Усредненное радиальное усилие на черновом этапе шлифования  $\bar{P}_y^*$  поддерживается на постоянном уровне, величина которого определяется из минимума приведенных затрат на операцию. В конце цикла, на этапе чистового шлифования закон изменения радиального усилия следует ограничению (16). Закон изменения степени демпфирования имеет релейный характер - на начальном участке цикла степень демпфирования поддерживается на постоянном уровне, величина которого определяется на основе выражения (17):

$$d_n = (P_{max} - \bar{P}_y^*) \sqrt{\frac{b_4}{b_3 d_n^2 - (P_{max} - \bar{P}_y^*)^2 b_5}} \quad (27)$$

далее по достижении припуска  $Z_1$ , определяемого по формуле:

$$Z_1 = b_2 \bar{P}_y^* \tau_1, \quad (28)$$

где  $\tau_1 = \ln \left[ \frac{(P_{max} - \bar{P}_y^*) \sqrt{b_4 + b_5 d_{max}^2}}{b_3 (A_n - 1) d_n} \right]$ ;  $A_n$  - коэффициент исправления исходной погрешности при  $d = d_n$ , происходит переключение на максимальную степень демпфирования. Расчет показывает, что увеличение приведенных затрат на обработку отверстия при реализации квазиоптимального алгоритма не превышает 3% по сравнению со строго оптимальным.

Разработка промышленного варианта САУ процессом внутреннего  
врезного шлифования. Реализация найденного (см.рис.2) алгоритма связана с созданием системы управления радиальным усилием шлифования и степенью демпфирования привода поперечной подачи. Так как при врезном шлифовании направление радиального усилия и поперечной подачи совпадают, то радиальное усилие шлифования составляет большую часть нагрузки привода подачи. Контроль за радиальным усилием можно осу-

ществить различными способами, например, за счет использования специальных датчиков радиального усилия. В данном случае, как это показано в работах д.т.н. Тверского М.М., задача может быть решена проще - путем значительного снижения сил трения, а также ликвидации большого количества промежуточных звеньев в механизме поперечной подачи.

Гидрокинематическая схема САУ, которой был оснащен внутришлифовальный станок SIP 200x315/I (ГДР), применяемый для шлифования посадочного отверстия и базового торца шестерен коробки перемены передач (КПП) трактора Т-130, приведена на рис.3. Усилие подачи создается за счет разности сил, которые развивают плунжерные гидроцилиндры 2 и 4, и приложено непосредственно к шлифовальной бабке 3, установленной на основании с помощью крестового пружинного шарнира 7. Гидроцилиндры связаны с гидросистемой станка через дроссель с регулятором 1Д, который обеспечивает постоянство расхода масла. Для получения требуемой динамической характеристики привода подачи, а также обеспечения стабильной работы дросселя с регулятором расхода применен дроссель слива 2Д. Необходимая степень демпфирования привода, а следовательно, и соответствующий закон изменения радиального усилия шлифования, обеспечивающий исправление исходной погрешности до заданной величины, осуществляется при помощи гидравлических дросселей 3Д и 4Д, устанавливаемых на входе в гидроцилиндр 4. При рабочей подаче шлифовального круга масло поступает в гидроцилиндр 2, а также через распределители 5,6 и дроссель 3Д, обеспечивающий начальную степень демпфирования, гидроцилиндр 4. Переключение на максимальную степень демпфирования, создаваемую дросселем 4Д, производится распределителем 5 по команде от прибора активного контроля I типа "Аэропан", которым оснащён базовый станок. Момент переключения, а следовательно, и величина припуска  $Z$ , (см. выражение (28)), определяется на основе полученного оптимального решения. На чистовом участке цикла радиальное усилие шлифования изменяется по закону (26), реализация которого обеспечивается при помощи плоской пружины большой жесткости 8, на деформацию которой затрачивается часть усилия привода подачи, начиная с некоторого значения  $Z_{\text{чист}}$ . Величина жесткости пружины рассчитывается по формуле:

$$j_{\text{пр}} = \frac{\bar{P}_y^* - \bar{P}_{yк}}{Z_{\text{чист}}} \quad (29)$$

Прибор активного контроля I используется также для подачи команды на отвод стола для промежуточной правки шлифовального круга (перемещение салазок станка в направлении правящего алмаза на величину

компенсации механизмом поперечной подачи 9 базового станка) и команды на окончание процесса шлифования. Для упрощения движениями шлифовальной бабки, поперечных салазок и стола в состав САУ входит, кроме привода поперечной подачи и прибора активного контроля, также соответствующим образом модернизированная система путевой автоматики.

На основе принятого алгоритма управления процессом внутреннего врезного шлифования была также произведена модернизация внутришлифовального полуавтомата ЛЗ-154.

Определение основных параметров настройки САУ производится в следующей последовательности: исходя из минимума выбранного критерия оптимальности, находится величина усредненного радиального усилия  $\bar{P}_y^*$ , поддерживаемого на черновом участке цикла. По выражению (27) определяется начальная степень демпфирования привода подачи. Величина расхода жидкости  $Q$  через дроссель с регулятором выбирается из условия его стабильной работы (для примененного в созданной системе дросселя Г55-2I величина  $Q$  принята равной  $1000 \text{ см}^3/\text{мин}$ ). Величину сопротивления  $N$  дросселя слива 2Д, а также сопротивлений  $R_n$  и  $R_{\max}$  демпфирующих дросселей 3Д и 4Д можно найти по формулам:

$$N = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{P_y^* + d_n \dot{y}_{\text{шл}}}{\Delta F}}; \quad R_n = \frac{d_n - 2Q\Delta F^2 N^2}{F_{14}^2}; \quad R_{\max} = \frac{d_{\max} - 2Q\Delta F^2 N^2}{F_{14}^2}$$

Далее, по выражению (28) определяется величина припуска  $z$ , при достижении которого происходит переключение с  $d_n$  на  $d_{\max}$ ; по выражению (29) определяется жесткость пружины  $\delta$ .

Производственные испытания разработанной САУ внутренним врезным шлифованием были проведены на Челябинском заводе тракторных агрегатов (ЧЗТА) на операции шлифования посадочного отверстия шестерен КПП с целью проверки и уточнения выбранных параметров системы, выработки практических рекомендаций по эксплуатации САУ. Результаты проведенных производственных испытаний показывают, что при шлифовании на станке SIP 200x315/I, оснащенный разработанной САУ, обеспечивается стабильное получение 2-го класса точности отверстия без непосредственного контроля его размера в процессе обработки. Косвенный контроль размера осуществляется по положению шлифовальной бабки, что позволило значительно упростить САУ. Кроме этого, в результате испытаний, выявлена возможность повышения производительности обработки за счет исключения операции хонингования, снижения расхода инструмента, уменьшения себестоимости обработки при надежном обеспечении требований техпроцесса, что дает основание для широкого внедрения разработанной САУ в производство.

Внедрение разработанной системы на ГП8-14 (г.Прокопьевск) на операции шлифования посадочных отверстий внутренних колец подшипников позволило повысить производительность обработки в 1,2 ... 1,4 раза, точность размера и формы отверстия - в 1,5 ... 2 раза. Годовой экономический эффект от внедрения САУ на одном станке - 1250 руб.

В результате внедрения системы автоматического управления на ЧСТА достигнуто повышение производительности обработки в 1,5...1,6 раза. Автоматизация перехода торцового шлифования, ранее выполнявшегося вручную, позволила осуществить многостаночное обслуживание. Годовой экономический эффект по акту внедрения составил 62.000 руб.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В  
СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ АВТОРА:

1. Выбор критерия оптимальности управления обработкой на внутришлифовальных станках. Тезисы докладов к научно-техническому совещанию "Повышение производительности металлорежущих станков и точности обработки путем применения адаптивных систем", ЛДНТП, Л, 1973 (Полетаев В.А.\*).

2. Процесс внутреннего шлифования деталей с управляемой радиальной силой. Тезисы докладов Западно-Сибирской региональной конференции молодых ученых "Радиоэлектроника и управление", Томск, 1974 (Полетаев В.А., Терехин В.И.).

3. Исправление некруглости при внутреннем шлифовании колец подшипников №312. Сб.науч.тр. КузДИ №72"Вопросы высокопроизводительной обработки металлов резанием", Кемерово, 1975 (Полетаев В.А.).

4. Управление качеством обработки деталей при внутреннем шлифовании. Науч.техн.реф.сб. "Абразивы", №7, М, НИИМАШ, 1976. (Полетаев В.А.).

5.Повышение точности деталей в поперечном сечении при внутреннем: врезном шлифовании. Науч.техн.реф.сб."Абразивы", №9, М., НИИМАШ, 1976 (Полетаев В.А.).

6. Исследование процесса образования поверхности отверстия при внутреннем шлифовании. Сб.науч.тр.ЧПИ №178 "Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки", Челябинск, 1976 (Каленик Д.В.).

7. Вариационная задача построения оптимального цикла обработки при внутреннем шлифовании. Там же (Тверской М.М.).

8. Выбор оптимальных параметров гидропривода САУ процессом внутреннего врезного шлифования. Сб.науч.тр. ЧПИ №180 "Оптимизация параметров машин и производственных процессов. Челябинск, 1976 (Каленик Д.В.).

\* Здесь и далее в скобках указаны соавторы.

9. Разработка алгоритма оптимального управления процессом внутреннего шлифования на основе принципа максимума. Тезисы докладов конференции "Прогрессивные технологические процессы обработки деталей и сборки приборов", Киев, 1976 (Тверской М.М.).

*Тверской М.М.*