

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ УКРАИНЫ
„ КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ „**

На правах рукописи

УДК 621.923

БУРЕК ЯН

**АДАПТИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОМ ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ВАЛОВ**

Специальность: 05.03.01. - Процессы механической и физико-технической
обработки, станки и инструменты

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

КИЕВ - 1997

Дв. 38 2 86

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00750995 (Z)

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ УКРАИНЫ
„ КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ „**

**На правах рукописи
УДК 621.923**

БУРЕК ЯН

**АДАПТИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОМ ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ВАЛОВ**

**Специальность: 05.03.01. - Процессы механической и физико-технической
обработки, станки и инструменты**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Киев - 1997



Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Киевском Жешувском политехнических институтах

Научный консультант - академик Академии инженерных наук Украины
доктор технических наук
профессор В.Б. Струтинский

Официальные опоненты - доктор технических наук
профессор А.А. Виноградов

- доктор технических наук
профессор А.Н. Гуржий

- доктор технических наук
профессор Ю.Н. Кузнецов

Ведущая организация

**Академия легкой промышленности
Украины**

Защита состоится 28 апреля 1997 года в 15⁰⁰ часов, на заседании специализированного Совета Д 01.02.09 по присуждению ученой степени доктора технических наук при Национальном техническом университете Украины „Киевский политехнический институт”.
Корпус 1 , ауд. 214

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального технического университета Украины „Киевский политехнический институт”

Автореферат разослан 1997 г.

Отзывы на автореферат диссертации в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью организации, просим направлять в адрес Национального технического университета Украины „Киевский политехнический институт” ученому секретарю.

Ученый секретарь
специализированного Совета

доктор технических наук
профессор Н.С. Равская



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Благодаря все возрастающему применению современного компьютерного обеспечения, особенно микропроцессорных систем, в технологии обработки появляются новые возможности управления производственными процессами, его оптимизации и контроля. С этой целью при реализации процессов производится непрерывный контроль его характерных параметров. С помощью современных алгоритмов преобразования сигналов от измеряемых величин можно в текущем времени (on-line) корректировать величины входных параметров (регулировать) а также рассчитывать контролируемые параметры (диагностика).

При врезном шифовании круглых поверхностей, осуществляемом как чистовая обработка, проблемы регулирования и контроля приобретают особое значение при обеспечении как можно более низких затрат с одновременно высоким качеством обработки. Во-первых, появление брака в этом процессе вызывает большие потери, т.к. заготовки перед этим прошли уже через ряд предыдущих технологических операций и имеют уже, в ряде случаев, значительную материальную ценность. Во-вторых, окончательное качество детали зависит непосредственно от этого процесса, т.к. он обычно является завершающей операцией технологического процесса. Поэтому целью контроля и регулирования этого процесса является не только обеспечение возможности идентификации ошибок и погрешностей обработки и прерывание процесса при их появлении, но и предвидение вероятности появления ошибки и осуществление соответствующих действий для ее предупреждения.

В существующей производственной практике устанавливаемые параметры врезного шлифования задаются как величины опытно-статистические, постоянные для целой партии обрабатываемых деталей. При этом способе осуществления процесса невозможно учесть появление каких-либо отклонений, например, износа и повреждения круга, изменения свойств обрабатываемого материала, отклонений качества предыдущей обработки и др.

Для обеспечения требуемых показателей качества обработки значения входных параметров шлифования заранее принимаются исходя из наименее благоприятных условий, а возобновление режущих свойств изношенного шлифовального круга производится значительно раньше, чем того требует его действительное состояние. Получаемое таким образом качество достигается за счет неоправданно завышенных времен: главного, вспомогательного и времени выстоя. Особенно чувствительно эта проблема проявляется потому, что врезное шлифование чаще всего применяется в крупносерийном и массовом производстве, например, при обработке колец подшипников качения, колеччатых валов и др.

С той же целью увеличения производительности обработки и минимизации влияния возмущений процесса на точность обработки современные шлифовальные станки с управлением NC (Numerical Control) и CNC (Computer Numerical Control) снабжаются дополнительными измерительными системами, как, например, система контроля действительного диаметра шлифуемого

изделия или система, позволяющая исключить так называемое "шлифование воздуха". Вводятся также достаточно простые системы адаптивного управления АС (Adaptive Control), которые на основе измерения таких характеристик процесса как сила или мощность шлифования управляют, чаще всего, скоростью поперечной подачи круга в зависимости от протекания процесса.

Поскольку ранее управление АС применялось лишь в отдельных случаях, при широком его практическом внедрении обнаружилось серьезные проблемы, связанные с техникой регулирования. В частности, это относится к технике измерения регулируемых величин и, прежде всего, к несоответствию параметров регуляторов. Как правило, стабильно установленный регулятор не соответствовал оптимальному ходу процесса шлифования. Поэтому в таких случаях возникали значительные погрешности регулируемых величин, а в ряде случаев даже потеря стабильности работы системы регулирования.

Здесь следует обратить внимание на существенные изменения характера процесса шлифования в течение периода стойкости круга. Поэтому правильно настроенный регулятор в начале обработки должен быть приведен в соответствие с новыми условиями. С этой целью следует использовать самонастраивающуюся систему управления АС, которая будет автоматически приводить параметры регулятора в соответствие с изменяющимися условиями шлифования (адаптивное регулирование).

Цель и задачи работы. В свете представленных рассуждений можно сформулировать тезис: существует необходимость разработки такой стратегии адаптивного регулирования процессом врезного шлифования, которая в случаях возникновения каких-либо возмущений процесса будет сохранять минимально-временной характер и гарантировать повторяемость выходного качества обработки при использовании измерительных систем, включенных в оснастку станка.

Динамику процесса врезного шлифования полнее всего отражает нормальная сила шлифования $F_{сн}$. Поэтому в дальнейших рассуждениях в качестве параметра регулирования процесса шлифования принята собственно эта сила.

Для реализации положений представленной выше стратегии адаптивного регулирования принята представленная на рис.1 схема регулирования силы $F_{сн}$ вместе с дополнительными условиями:

- ход процесса шлифования будет изменяться за счет обратной связи силы $F_{сн}$, так, чтобы она была нечувствительна к возмущениям высоких амплитуд и при этом динамически быстрой,
- изменение нормальной силы будет производиться в соответствии с заданным принципом регулирования в зависимости от отклонения e_F действительного значения силы $F_{сн}$ от данного w_F с помощью привода подачи в оси X через скорость поперечной подачи круга v_F относительно пути подачи x_F ,
- систему регулирования нормальной силы $F_{сн}$ необходимо одновременно использовать и как систему, исключаящую „шлифование воздуха”.

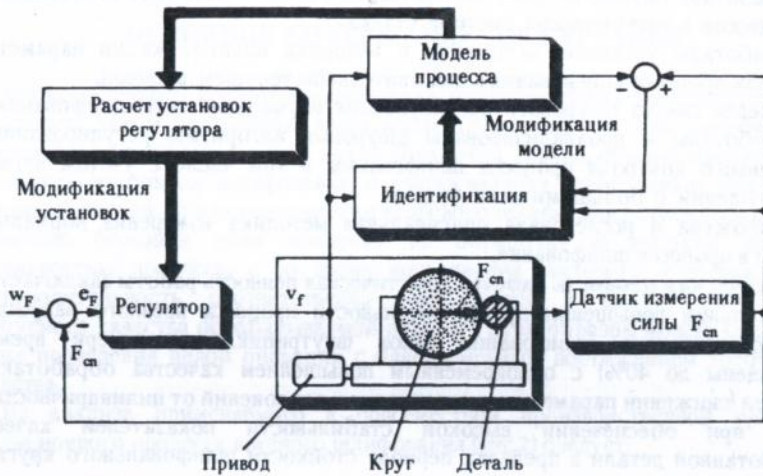


Рис. 1. Система адаптивного регулирования процессом врезного шлифования

После сравнения величин силы заданной w_F и измеренной $F_{сн}$ регулятор определяет величину скорости поперечной подачи круга v_f . Параметры модели идентифицируются с параметрами натурального процесса шлифования. Исходя из значений расчетной $F_{сн}^0$ и измеренной $F_{сн}$ сил выполняется модификация модели процесса. Зная эту модель, можно в дальнейшем определить параметры регулирования.

Задачи исследования. Поставленная цель работы реализована путем решения следующих задач:

1. Разработка цифровой модели процесса врезного шлифования, методики идентификации параметров этой модели, а также синтеза системы адаптивного регулирования.
2. Проведение симуляционных и экспериментальных исследований для верификации теоретической модели адаптивного регулирования.
3. Проведение технологических исследований процесса шлифования с адаптивным регулированием.
4. Разработка программных моделей (*software*) и систем (*hardware*) для реализации адаптивного регулирования процессом шлифования.
5. Разработка конструкций измерительных систем.

Научная новизна работы. В работе впервые получены следующие новые научные результаты.

1. Создана и исследована комплексная динамическая модель процесса шлифования для медленно изменяющихся величин, каковыми являются изменение режущих свойств шлифовального круга и упругие деформации системы станок-инструмент-деталь.

2. Разработана математическая модель анализа высокочастотных стохастических процессов в динамической системе станка.
3. Разработаны уравнения эстимации и методика идентификации параметров модели процесса шлифования в действительном текущем времени.
4. Проведен синтез цифрового регулирования нормальной силы шлифования.
5. Разработаны и проанализированы цифровые алгоритмы регулирования и активного контроля процесса шлифования, в том числе с учетом влияния возмущений с большими амплитудами.
6. Предложена и исследована оригинальная методика измерения нормальной силы в процессе шлифования.

Практическая ценность работы. Практическая ценность работы заключается в значительном повышении производительности процесса врезного наружного многоступенчатого шлифования валов (внутрицикловые потери времени сокращены до 40%) с одновременным повышением качества обработанных деталей (снижении параметров шероховатости и отклонений от цилиндричности до 50%) при обеспечении высокой стабильности показателей качества обработанной детали в пределах периода стойкости шлифовального круга по сравнению с традиционным шлифованием.

Реализация работы. Результаты работы были положены в основу разработки цифровой системы адаптивного управления типа SA-20 циклом работы шлифовального станка ROPA 16.50SA серийного производства на Механическом заводе в г. Тарнув (Польша). Система управления SA-20 была спроектирована, изготовлена, исследована и внедрена в серийное производство в период 1988-1994 г.г. в рамках договоров о научно-исследовательской работе U-1212, U-1766 и U-1855 между Жешовской Политехникой и Тарновским механическим заводом. Шлифовальный станок ROPA 16.50SA с ситемой управления SA-20 был награжден Золотой медалью на Международной ярмарке в Познани в 1992 г.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на конференциях "The international conference - Adaptive Control in Production Engineering" в 1985 и 1990 г.г. (Rydzyňa - Polska), "Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej" в 1986 и 1994 г.г., (Kraków - Polska), 3-й Українській конференції з автоматичного керування - "Автоматика 96" (Севастополь, 1996 г.). Диссертационная работа в целом докладывалась на семинарах Кафедры техник обработки и автоматизации Жешовской Политехники и Кафедры станков НТТУ "Киевский политехнический институт" в 1996-1997 г.г.

Публикации. Непосредственные результаты работы опубликованы в 28 научных трудах, среди которых 2 собственных монографии и 7 патентов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из вступления, 8 разделов, подведения итогов и выводов, списка литературы и приложений, в том числе 349 страниц сновного текста, 113 рисунков, 181 позиция литературы и 2 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Процесс точного врезного шлифования цилиндрических поверхностей, как наружных, так и внутренних, чаще всего осуществляется как многоэтапная операция в автоматизированном цикле обработки. В него, обычно, входят этапы черного, чистового шлифования и выхаживания, проводимые при одной установке детали. При осуществлении черного шлифования стремятся к съему возможно большей доли припуска на обработку с высокой производительностью процесса, а во время шлифования чистового и выхаживания производительность соответственно уменьшается в пользу обеспечения требуемого качества обрабатываемой детали. Таким образом можно сократить время проведения целой операции с одновременным достижением требуемого качества.

Из анализа применяемого в повсеместной производственной практике традиционного процесса врезного шлифования (рис.2) следует:

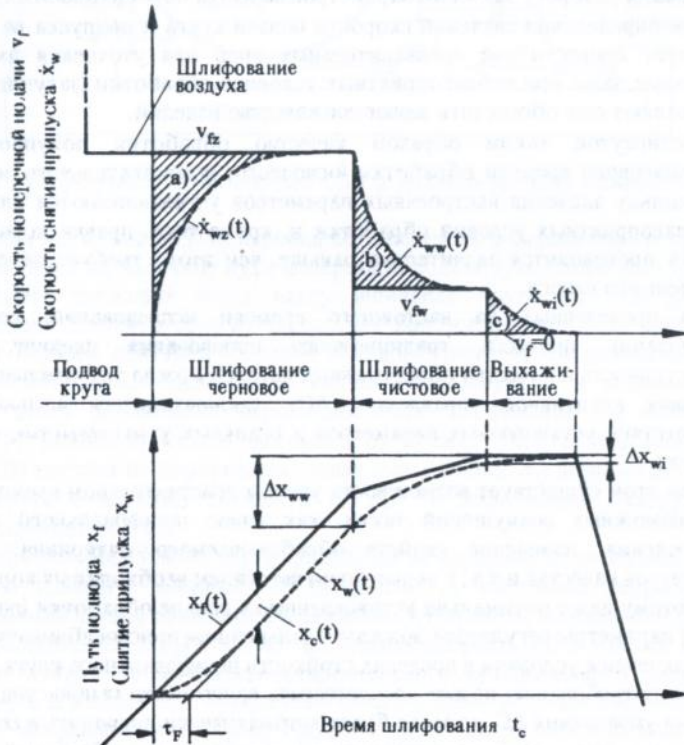


Рис.2. Характеристика протекания обычного многоступенчатого процесса врезного шлифования: а, в, с, - нестационарные фазы изменения скорости съема припуска на обработку $\dot{x}_w(t)$

- скорости врезной подачи шлифовального круга и разделение припуска между отдельными этапами шлифования задаются управляющей системой станка как величины, постоянные для всей партии деталей, обрабатываемых в течение периода стойкости шлифовального круга;
- главным факторами, влияющими на время проведения цикла обработки, являются так называемое „шлифование воздуха” и нестационарные фазы изменения скорости съема припуска на обработку, выступающие в начальной фазе процесса и при переключении скорости подачи во время переходов от этапа к этапу обработки;
- на изменение динамики процесса в нестационарных его фазах влияют, в особенности, податливость системы станок-деталь-инструмент (СДИ) и значение нормальной силы шлифования в зависимости от режущих свойств шлифовального круга:
- в результате существенного изменения режущих свойств круга в течение периода его стойкости происходит также существенное изменение нестационарных фаз скорости съема припуска, что, в результате, приводит к сильному разбросу значений параметров качества обрабатываемых деталей,
- при определении значений скорости подачи круга и припуска на обработку следует провести ряд предварительных проб для уточнения их значений, которые даже при неблагоприятных условиях обработки (затупленный круг) позволяют еще обеспечить желаемое качество изделий,
- достигнутое таким образом качество обработки покупается ценой увеличенного времени обработки (основного, вспомогательного и простоев), поскольку значения настроечных параметров устанавливаются для наиболее неблагоприятных условий обработки и, кроме того, правка шлифовального круга производится значительно раньше, чем этого требует действительная степень его износа.

Из проведенных до настоящего времени исследований, посвященных оптимизации процесса традиционного шлифования следует, что его эффективность и качество обработанных деталей можно значительно повысить, применяя адаптивное управление (АС), заключающееся в приведении в соответствие установочных параметров и реальных характеристик протекания процесса.

При этом существует возможность учета в действительном времени (on-line) его возможных возмущений таких, как износ шлифовального круга, его повреждения, изменение свойств обрабатываемого материала, колебания параметров качества и т.д., с дальнейшим введением необходимых корректив.

Потому даже оптимально установленные в начале обработки (после правки круга) параметры регулятора должны в дальнейшем приспособляться к новым изменяющимся условиям в пределах стойкости шлифовального круга.

Этому требованию может удовлетворять единственно самонастраивающаяся система управления АС, которая будет автоматически приводить в соответствие параметры регулятора на основе соответствующе разработанной стратегии регулирования.

• Низкочастотная модель процесса шлифования

Основой разработки принятой стратегии адаптивного регулирования является модель, достаточно полно описывающая его характеристики, статические и динамические. Поэтому в работе предварительно разработана компьютерная модель процесса шлифования, описывающая все основные динамические явления. Подробно проанализированы и разработаны частная модели упругих деформаций x_c системы СДИ, нормальной силы шлифования, F_{cn} сьема припуска на обработку x_w и радиального износа шлифовального круга x_r (рис. 3).



Рис. 3. Структурная схема системы СДИ в процессе врезного шлифования

Привод движения подачи перемещает шпиндель шлифовального круга в направлении оси X на величину пути поперечной подачи x_f со скоростью v_f . Это поступательное движение через массу шпинделя круга m_x и упруго-демпфирующие элементы c_x и d_x определяет положение середины круга x_{sm} . Начиная от первого контакта (касания) шлифовального круга диаметром d_x с деталью диаметром d_w дальнейшее перемещение круга x_f и возникающая вследствие этого перемещени нормальная сила шлифования F_{cn} вызывают упругие деформации (отжатия) системы СДИ. Полная упругая деформация x_c системы СДИ состоит из деформации станка (элементы c_x, d_x) деформации зоны контакта круга с деталью (элементы c_s, d_s) и деформации базирующих элементов (элементы c_w, d_w).

Шпиндель шлифовального круга приводится во вращение от отдельного двигателя цепи главного движения со скоростью n_s (окружная скорость v_s). Обрабатываемая деталь приводится в движение от привода шпинделя передней бабки и вращается со скоростью n_w (окружная скорость v_w) в том же направлении, что и круг. В результате относительного вращательного движения детали и круга и воздействия нормальной силы F_{cn} появляется касательная сила резания F_{ct} , направленная в сторону главного движения резания и вызывающая сьем металла x_w с обрабатываемой поверхности детали. Сила эта вызывает также радиальный износ круга x_r .

При анализе динамики процесса шлифования на первый план выступают два явления. Во-первых, нормальная сила шлифования F_{cn} при скачкообразном изменении скорости врезной подачи круга v_f возрастает с запаздыванием, зависящим от релаксации системы СДИ, а, во-вторых, существует возможность возникновения колебаний в системе, вызванных наличием волнистости или некруглости поверхности детали и шлифовального круга.

С использованием приведенных выше функциональных зависимостей получена комплексная интегральная модель врезного шлифования, представленная на рис. 4.

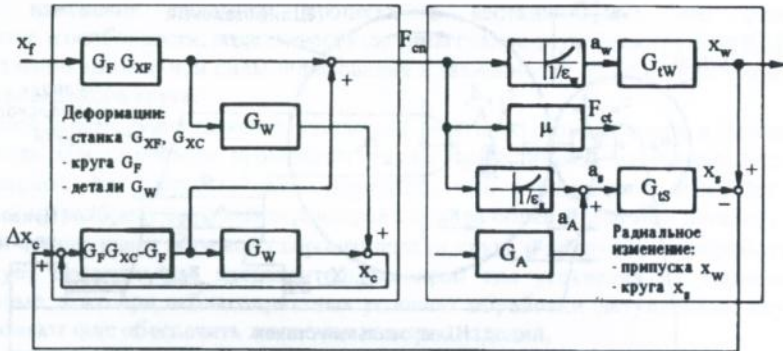


Рис. 4. Обобщенная модель динамики процесса врезного шлифования

Из приведенных на рис. 4. связей можно сделать вывод, что функциональный блок упругих перемещений является многопараметрическим. Входными параметрами являются: путь подачи круга x_f в направлении оси X, скорректированный сьем припуска x_w и уменьшение диаметра круга x_s , а также перемещение зоны контакта Δx_c . Выходными параметрами в этом случае суть нормальная сила F_{cn} и упругие перемещения x_c в системе СДИ.

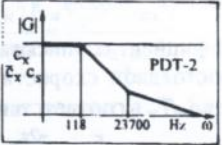
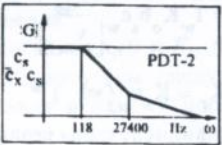
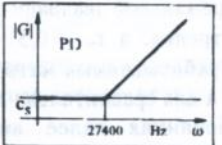
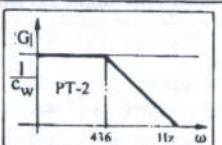
В функциональном блоке изменения припуска и круга входными параметрами являются нормальная F_{cn} и параметры, характеризующие правку круга. Выходными параметрами сьем припуска на обработку x_w и радиальный износ круга x_s .

Собственные исследования автора в области анализа динамики сил шлифования показали, что динамические характеристики процесса имеют принципиальное значение в двух частных областях. Во-первых, в передаточных функциях G_F G_{XF} реакции нормальной силы F_{cn} на изменение скорости подачи v_f вдоль оси X выступают частоты ниже 10 Hz. Вторых, вибрации при шлифовании появляются при частотах выше 10 Hz. Поэтому для их анализа должна быть использована высокочастотная модель процесса шлифования.

При низкочастотных передаточных функциях допустимо физическое упрощение модели процесса с учетом влияния лишь отдельных параметров процесса в области частот, не превышающих 10 Hz.

Из представленных в таб. 1 четырех частотных характеристик следует, что минимальная граничная частота находится выше области частот низкочастотной модели (около 10 Hz).

Таблица 1. Частотные характеристики частных передаточных функций системы СДИ

<p>Привод подачи</p> $G_{XF} = \frac{c_x + d_x s}{m_x s^2 + (d_x + d_s)s + (c_x + c_s)}$	$\lim_{s \rightarrow 0} G_{XF} = \frac{c_x}{c_x + c_s}$	
<p>Зона контакта круга</p> $G_{XC} = \frac{c_s + d_s s}{m_x s^2 + (d_x + d_s)s + (c_x + c_s)}$	$\lim_{s \rightarrow 0} G_{XC} = \frac{c_s}{c_x + c_s}$	
<p>Нормальная сила</p> $G_F = d_s s + c_s$	$\lim_{s \rightarrow 0} G_F = c_s$	
<p>Деталь</p> $G_W = \frac{1}{m_w s^2 + d_w s + c_w}$	$\lim_{s \rightarrow 0} G_W = \frac{1}{c_w}$	

Поэтому эти частные передаточные функции с достаточной точностью могут быть аппроксимированы своими граничными стационарными значениями $\lim_{s \rightarrow 0} G(s)$. В этом случае указанные передаточные функции учитывают лишь коэффициенты жесткости c элементов системы СДИ.

Влияние радиального износа круга можно считать пренебрежительно малым по отношению к съему припуска на обработку x_w .

С учетом этих упрощений, съема припуска на обработку x_w можно рассчитать исходя из изменения пути подачи $x_f(t)$ и упругого перемещения $x_c(t) = F_{cn}(t)/c_c$ системы СДИ в зависимости:

$$x_w(t) = x_f(t) - x_c(t) = x_f(t) - \left[1/c_x + 1/c_s + 1/c_w \right] F_{cn}(t) = x_f(t) - F_{cn}(t)/c_c \quad (1)$$

Принимая далее время одного оборота детали $T_w = \pi d_w/v_w$, получаем действительную глубину резания

$$a_w(t) = x_w(t) - x_w(t - T_w) \quad (2)$$

а также получаем уравнение силы резания для всей ширины шлифования b , в виде:

$$F_{cn} = K_0 b_s \left[\frac{v_w}{v_s} \right]^{2\epsilon_w - 1} \left[x_w(t) - x_w(t - T_w) \right]^{\epsilon_w} = G_c(a_w, v_w, v_s) \quad (3)$$

$$\text{или } F_{cn} = (\alpha / T_w) \left[x_w(t) - x_w(t - T_w) \right] \quad (4)$$

Коэффициент α описывает здесь порпроциональную зависимость силы резания от постоянной скорости подачи v_f и постоянной окружной скорости детали $v_{wo} = \pi d_w T_w$ в соответствии с уравнением:

$$\alpha = T_w K_0 b_s \epsilon_w \left[\frac{v_{wo}}{v_{so}} \right]^{2\epsilon_w - 1} \left[\frac{v_f}{T_w} \right]^{\epsilon_w - 1} = K_f b_s v_{so}^{-2\epsilon_w} (v_{wo} v_{fo})^{\epsilon_w - 1} \quad (5)$$

где $K_f = K_0 \epsilon_w (\pi d_w)^{\epsilon_w}$

Коэффициент силы резания ϵ_w может принимать значения от 0,5 до 1,0, при этом экстремальное значение $\epsilon_w = 1,0$ соответствует исключительно процессу резания без трения, а $\epsilon_w = 0,5$ - процессу трения без резания. В практике для труднообрабатываемых материалов показатель ϵ_w приобретает значение около 0,65-0,75, а для сравнительно легко обрабатываемых материалов, - в районе 0,85-0,95.

Принимая далее линеализированное уравнение нормальной силы (4), получаем упрощенную модель процесса шлифования, представленную на рис. 5.

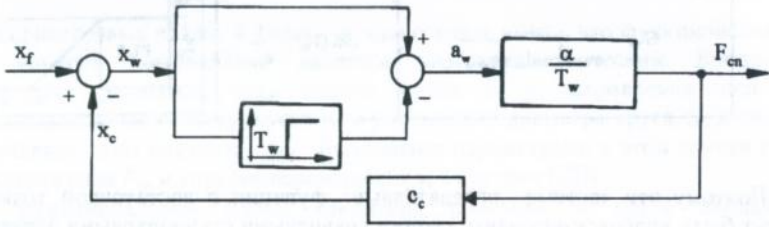


Рис. 5. Упрощенная динамическая модель процесса врезного шлифования

Как видно, временная характеристика процесса резания описывается членом с запаздыванием во времени $T = T_w$ и коэффициентами c_c , α , T_w .

Подставляя (1) в уравнение (4), получаем зависимость нормальной силы от перемещения круга в соответствии с зависимостью:

$$F_{cn}(t) = a_p F_{cn}(t - T_w) + b_p [x_f(t) - x_f(t - T_w)] \quad (6)$$

$$\text{где: } a_p = \frac{\alpha}{\alpha + T_w c_c}, \quad b_p = \frac{c_c \alpha}{\alpha + T_w c_c} \quad (7)$$

Из уравнения (6) видно, что действительная нормальная сила зависит от ее значения при предыдущем обороте и от разницы подачи в течение этого оборота.

Для разработки алгоритмов регулирования и диагностирования в технике регулирования обычно используются передаточные функции между входным сигналом (перемещение x_f) и выходным (нормальная сила F_{cn}), а именно:

$$G_{P1}(s) = \frac{F_{cn}(s)}{x_f(s)} = \frac{b_p(1 - e^{-T_w s})}{1 - a_p e^{-T_w s}} \quad (8), \quad G_{P1}(z) = \frac{F_{cn}(z)}{x_f(z)} = \frac{b_p(1 - z^{-d})}{1 - a_p z^{-d}} \quad (9)$$

где s - оператор Laplace'a, оператор $z = e^{T_0 s}$,

T_0 - длительность пробных сигналов,

$d = T_w/T_0$ - количество сигналов на один оборот изделия.

Если за время одного оборота детали считывается d сигналов $x_f(t)$ и $F_{cn}(t)$ при длительности сигнала $T_0 = T_w/d$, то из уравнения (6) получаем следующее дискретно-временное уравнение в разностях для описания динамики процесса шлифования:

$$F_{cn}(k) = a_p F_{cn}(k-d) + b_p [x_f(k) - x_f(k-d)], \quad kT_0 = T_0, 2T_0, 3T_0, \dots \quad (10)$$

Съем радиального припуска на обработку $x_w(t)$, в соответствии с уравнением (4) получается из связи с нормальной силой резания; в этом случае передаточная функция описывается уравнениями:

$$G_{P2}(s) = \frac{x_w(s)}{F_{cn}(s)} = \frac{c_p}{1 - e^{-T_w s}}, \quad c_p = T_w/\alpha \quad (11), \quad G_{P2}(z) = \frac{x_w(z)}{F_{cn}(z)} = \frac{c_p}{1 - z^{-d}} \quad (12)$$

Для проектирования системы регулирования нормальной силы кроме модели процесса шлифования необходима также передаточная функция системы привода поперечной подачи круга $G_M(s)$, которая описывает динамические характеристики системы регулирования перемещений по оси X при изменении установленной подачи $w_{xf}(t)$.

С учетом запаздывания в динамическом контуре системы привода подачи ожидаемое перемещение шлифовального круга x_f также происходит с запаздыванием. В системе регулирования это приобретает значение лишь тогда, когда временная постоянная привода подачи есть величиной одного порядка с временной постоянной процесса T_p . Поскольку временная постоянная для обычно применяемых приводов подачи не превышает значений 0,1 с, а временная постоянная процесса врезного шлифования достигает значений порядка 2-4 с, то скоростные характеристики системы привода превышают на два порядка характеристики изменения процесса.

Отсюда при проектировании системы регулирования нормальной силы можно пренебречь влиянием системы привода подачи на динамические характеристики всего процесса. Таким образом, систему подачи шлифовального круга можно рассматривать как пропорциональную, где $x(t) = w_{xf}(t)$.

В используемых до настоящего времени технологиях шлифования вместо задания величины перемещения $w_{xf}(t)$ используется его скорость $w_f(t)$.

Перемещение, описываемое как $w_{xf}(t)$, получается в этом случае как выходная величина интегрирующего фильтра с передаточной функцией $G_{IF}(s) = w_{xf}(s) / w_{vf}(s) = 1/s$ или $G_N(z) = x_f(z) / w_{vf}(z) = T_0 z^{-1} / (1 - z^{-1})$

Отрезок траектории регулирования нормальной силы, состоящий из последовательного соединения членов $G_N(z)$ и $G_{P1}(z)$, описывает передаточная функция

$$G_{SF}(z) = \frac{F_{cn}(z)}{w_{vf}(z)} = \frac{b_p T_0 (1 - z^{-d}) z^{-1}}{(1 - z^{-1})(1 - a_p z^{-d})} \quad (13)$$

Для проектирования контура регулирования и активного контроля в соответствии с концепцией, представленной на рис. 6, необходимо определение динамических явлений, имеющих место в процессе шлифования (идентификация процесса).



Рис. 6. Структура системы адаптивного регулирования процессом врезного шлифования

Используя теоретическую модель динамики процесса шлифования, выведены уравнения эстимации, необходимые для экспериментальной идентификации процесса. Для этого использованы с поправками на учет специфических особенностей процесса шлифования известные оптимизированные цифровые алгоритмы на базе метода наименьших квадратов.

Исходя из уравнения (10) и принимая, что за время одного оборота изделия входной (подвод $x_f(k)$) и выходной (нормальная сила $F_{cn}(k)$) сигналы процесса считываются один раз, получим следующее дискретное во времени уравнение эстимации 1-го порядка:

$$F_{cn}(k) = a_p F_{cn}(k-1) + b_p [x_f(k) - x_f(k-1)] = \Psi_1^T(k) \hat{\Theta}_1 \quad (14)$$

$$\text{где: } \Psi_1^T = [F_{cn}(k-1)(x_f(k) - x_f(k-1))] \quad , \quad \hat{\Theta}_1 = [\hat{a}_p \hat{b}_p]$$

Отсюда можно определить параметры \hat{a}_p и \hat{b}_p упрощенной модели в соответствии с уравнением (6). Исходя из них можно затем рассчитать в соответствии с уравнением (7) общую жесткость c_c системы СДИ

$$\hat{c}_c = \frac{\hat{b}_p}{\hat{a}_p} \quad (15)$$

Коэффициент α нормальной силы F_{cn} определен только для постоянных скоростей подачи v_f и поэтому не может быть определен непосредственно из уравнения (6). Если, однако, применить передаточную функцию $G_{SF}(z) = F_{cn}(z)/w_{vf}(z)$ (уравнение 13) и подставить взвешенные параметры \hat{a}_p и \hat{b}_p , то можно определить эстиматор $\hat{\alpha}$ как коэффициент усиления по зависимости

$$\hat{\alpha} = \frac{F_{cn}(\infty)}{v_{f0}} = \frac{F_{cn}(\infty)}{w_{vf}(\infty)} = \lim_{z \rightarrow 1} G_{SF}(z) = \frac{\hat{b}_p T_w}{1 - \hat{a}_p} \quad (16)$$

Измеря при помощи системы активного контроля уменьшение радиального припуска на обработку детали x_w можно непосредственно идентифицировать экспериментальное линейное уравнение нормальной силы (4) в соответствии с зависимостью

$$F_{cn}(k) = 1/c_p [x_w(k) - x_w(k-1)] = \Psi_2^T \hat{\Theta}_2 \quad (17)$$

$$\text{где: } \Psi_2 = x_w(k) - x_w(k-1) \quad , \quad \hat{\Theta}_2 = 1/\hat{c}_p$$

Отсюда можно определить коэффициент $\hat{\alpha}$ в соответствии с зависимостью (4), а именно:

$$\hat{\alpha} = T_w / \hat{c}_p = \hat{\Theta}_2 T_w \quad (18)$$

Ниже описан проект цифрового регулятора нормальной силы F_{cn} в соответствии с концепцией регулирования, представленной на рис. 6. Под проектом регулятора здесь подразумевается только лишь описание его установок, а не изменения алгоритма регулирования. Предварительно принят регулятор типа PI. При этом надо заметить, что модель траектории регулирования $G_{SF}(z) = F_{cn}(z)/w_{vf}(z)$ в соответствии с уравнением (13) зависит от числа регистраций за время оборота детали. Поэтому вначале запроектирован регулятор для одной регистрации на оборот ($d = 1$), а затем расширен для множества регистраций. Связь динамических членов контура регулирования, состоящих из: регулятора силы $G_{RF}(z) = w_{vf}(z)/e_f(z)$, приводной компоненты $G_N(z) = x_f(z)/w_{vf}(z)$ и передаточной функции процесса шлифования $G_{PI}(z) = F_{cn}(z)/x_f(z)$.

Если применить дискретный во времени регулятор PI с передаточной функцией

$$G_{RF}(z) = \frac{w_{vf}(z)}{e_F(z)} = \frac{q_{F0} + q_{F1}z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (19)$$

где: $q_{F0} = K_p \left(1 + \frac{T_0}{2T_I}\right)$, $q_{F1} = -K_p \left(1 + \frac{T_0}{2T_I}\right)$,

K_p - усиление регулятора, T_I - время интегрирования
то, используя передаточную функцию объекта регулирования G_{SF} в соответствии с уравнением (13), получаем для открытого контура регулирования следующую передаточную функцию:

$$G_{OF}(z) = \frac{F_{cn}(z)}{e_F(z)} = \frac{z^{-1}T_0 b_p q_{F0} (1 + q_{F1}/q_{F0}z^{-1})}{(1 - z^{-1})(1 - a_p z^{-1})} \quad (20)$$

Величина $e_F(z)$ представляет здесь погрешность регулирования между силами заданной $w_F(z)$ и действительной $F_{cn}(z)$. Приняв $q_{F1}/q_{F0} = -a_p$, компенсируем этим запаздывание характеристик процесса шлифования и при $T_0 = T_w$ получаем передаточную функцию замкнутого контура регулирования

$$G_{OF}(z) = \frac{T_0 b_p q_{F0} z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (21)$$

Для динамической характеристики замкнутого контура получается затем характеристика запаздывания 1-го рода, которую можно описать с помощью выбора q_{F0} , а именно:

$$G_{WF}(z) = \frac{G_{OF}(z)}{1 + G_{OF}(z)} = \frac{T_0 b_p q_{F0} z^{-1}}{1 + (T_0 b_p q_{F0} - 1)z^{-1}} = \frac{F_{cn}(z)}{w_F(z)} \quad (22)$$

Вводя затем замену временной постоянной T_F для возрастающей нормальной силы при шаговом изменении заданной силы w_F получаем

$$q_{F0} = \frac{1 - a_F}{T_0 b_p}, \quad \text{где: } a_F = e^{(-T_0/T_F)} \quad (23)$$

Поскольку постоянная времени T_F принимается значительно меньшей, нежели временная постоянная процесса T_p , получаем непосредственно искомую динамику замкнутого контура.

Представленная стратегия регулирования нормальной силы F_{cn} , была компьютерно смоделирована. При этом были исследованы: во-первых, динамика возрастания и падения силы F_{cn} и, во-вторых, влияние наиболее часто встречающихся в практике возмущений, возникающих в результате эксцентричного закрепления детали. Для сравнения этой стратегии регулирования с традиционными способами управления процессом шлифования была проведена также симуляция шлифования с постоянной скоростью подачи круга v_f и со

стабилизированной нормальной силой. Исследования проведены для процесса, состоящего из шлифования чернового и чистового.

Шлифование с регулированием нормальной силы заготовок с эксцентриситетом требует применения специальной стратегии регулирования (рис.7)

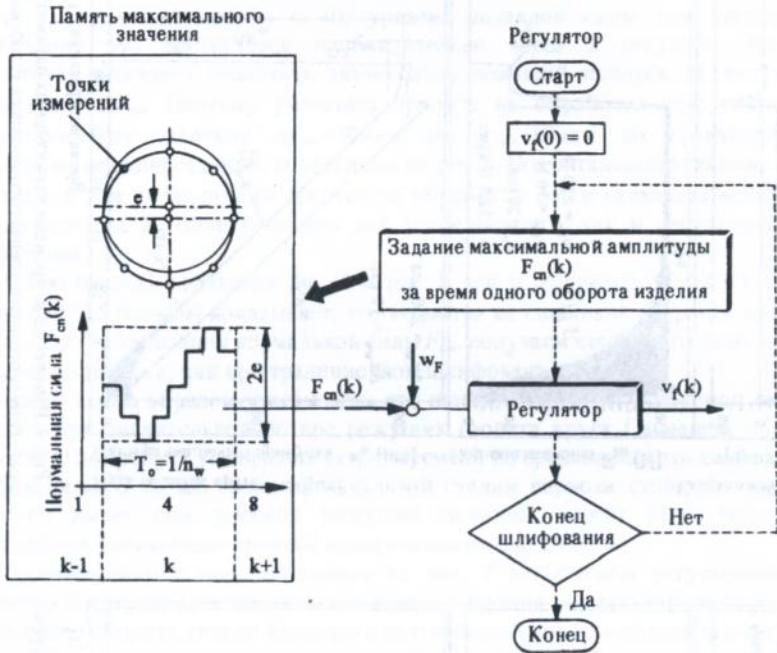


Рис. 7. Стратегия управления скоростью подачи шлифовального круга в начальной фазе шлифования с пооборотным (на 1 оборот детали) регулированием процесса ($T_0 = T_w = 1/n_w$)

Зерном этой стратегии является введение в память максимального значения нормальной силы F_{cn} , которое может быть достигнуто при шлифовании за время одного полного оборота детали. Именно это значение является опорной точкой для определения погрешности регулирования ϵ_r . При этой стратегии скорость врезной подачи круга v_f изменяется с частотой, равной частоте вращения детали, что в каждом случае гарантирует не превышение заданного значения силы w_f .

Эта стратегия может быть также необходимой при шлифовании изделий, имеющих предварительно выполненные канавки (валы со шпоночными канавками, шлицевые валы). Ее можно также использовать и при шлифовании идеально круглых деталей без каких-либо отклонений формы.

Изменения во времени скорости врезной подачи круга $v_f(t)$, нормальной силы шлифования $F_{cn}(t)$, пути подвода круга $x_f(t)$ и съем припуска на обработку $x_w(t)$ для двухступенчатого обычного и регулируемого шлифования, состоящего из этапов чистового и чернового, показаны на рис. 8-9.

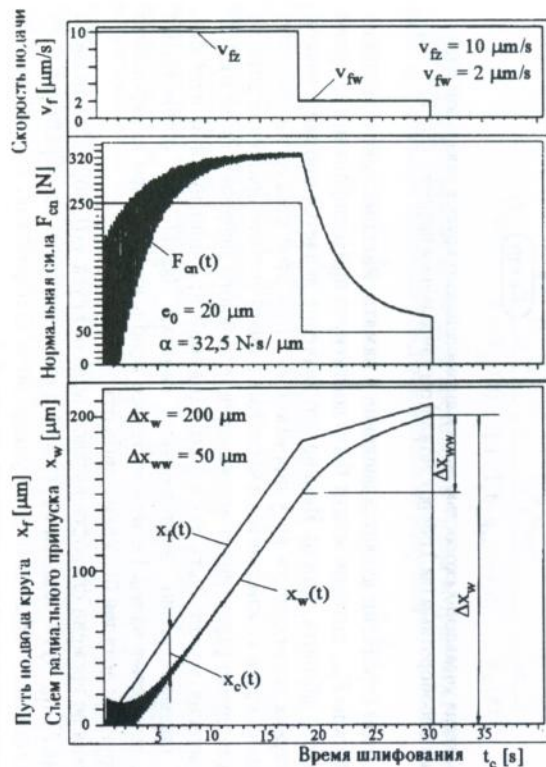


Рис. 8. Изменение во времени характерных параметров обычного двухступенчатого процесса шлифования

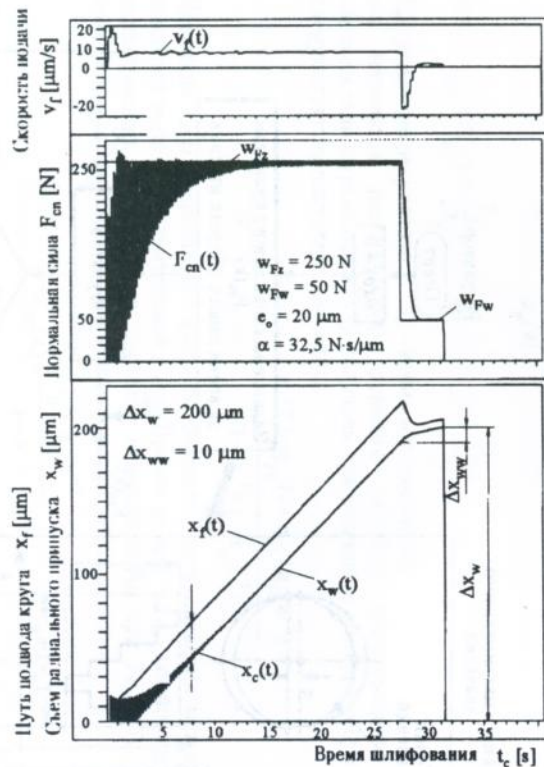


Рис. 9. Изменение во времени характерных параметров регулируемого двухступенчатого процесса шлифования

Из протекания регулируемого процесса (рис.9) заметно значительное уменьшение времени нестационарных фаз как на этапе черного, так и чистового шлифования. Этап черного шлифования начинается со скоростью подачи круга $v_{\gamma} \cong 20 \text{ мкм/с}$, поэтому уже после третьего оборота изделия достигается заданное значение силы для этого этапа. В результате мгновенного отвода круга от детали ($v_{\gamma} < 0$), уровень заданной силы для чистового шлифования w_{Fw} достигается приблизительно через 2 секунды. Это, в результате, позволяет назначить значительно меньший припуск на чистовое шлифование Δx_{ww} . Поэтому уменьшен припуск на обработку при чистовом шлифовании от значения $\Delta x_{ww}=50 \text{ мкм}$ до $\Delta x_{ww}=10 \text{ мкм}$ по сравнению с традиционным шлифованием, показанным на рис. 8. Все остальные установочные величины, в том числе общий припуск на обработку Δx_w и начальная величина эксцентриситета e_o , одинаковы как для традиционного, так и регулируемого шлифования.

В свою очередь сравнение рис. 8 и рис. 9 для изношенных шлифовальных кругов ($\alpha=32,5 \text{ Нс/мкм}$) показывает, что несмотря на снижение скорости подачи круга v_{γ} для стабилизации нормальной силы F_{cn} , получаем приблизительно такое же время обработки, как при традиционном шлифовании.

Можно таким образом утверждать, что шлифование с регулируемой силой F_{cn} даже при значительной потере режущих свойств круга (в нашем случае около 30%) не требует увеличения затрат времени по сравнению с традиционным шлифованием. В то же время на начальной стадии периода стойкости круга, когда он имеет еще высокие режущие свойства, может быть получено значительное уменьшение времени шлифования (около 20-30%).

В соответствии с представленным на рис. 7 алгоритмом регулирования, регулятор после определения максимального значения нормальной силы $F_{cn \max}$ для каждого оборота детали изменяет в дальнейшем скорость подачи v_{γ} с тактом $T_o=1/n_w$. Из представленного на рис. 9 характера изменения нормальной силы $F_{cn}(k)$ видно, что в этом случае превышения установленного значения силы w_F не наблюдается. По достижении квазистационарного состояния силы $F_{cn}(k)$ скорость подачи круга $v_{\gamma}(k)$ изменяется очень медленно, только лишь вследствие утраты кругом режущих свойств. Для обеспечения постоянной нормальной силы F_{cn} при обработке всей партии деталей в течение периода стойкости круга следует адаптировать скорость подачи v_{γ} к изменению коэффициента α_k . Если определять параметры \hat{a}_p и \hat{b}_p после каждого цикла шлифования, то, во-первых, можно непрерывно параметры регулятора приводить в соответствие с состоянием процесса. Во-вторых, эту оценку можно использовать для стабилизации нормальной силы на заданном уровне в квазистационарных фазах с помощью изменения скорости подачи круга v_{γ} для реальной детали с учетом возрастающего затупления круга ($\alpha_k > \alpha_o$) в соответствии с зависимостью

$$v_{\gamma k} = v_{\gamma o} \frac{\alpha_o}{\alpha_k} \quad (24)$$

где: $v_{\gamma o}$, α_o - начальные значения скорости подачи v_{γ} и коэффициента α .

• **Высокочастотная модель процесса шлифования**

Для анализа высокочастотных стохастических колебательных процессов, возникающих в динамической системе станка, его упругая система разделена на ряд подсистем (рис. 10), которые учитывают: 1- поперечные высокочастотные колебания шпинделя, 2- рутильные колебания шпинделя, 3- движения шлифовальной бабки, 4 - поперечные колебания заготовки, 5 - крутильные колебания заготовки, 6 - крутильные колебания промежуточного вала привода вращения заготовки.

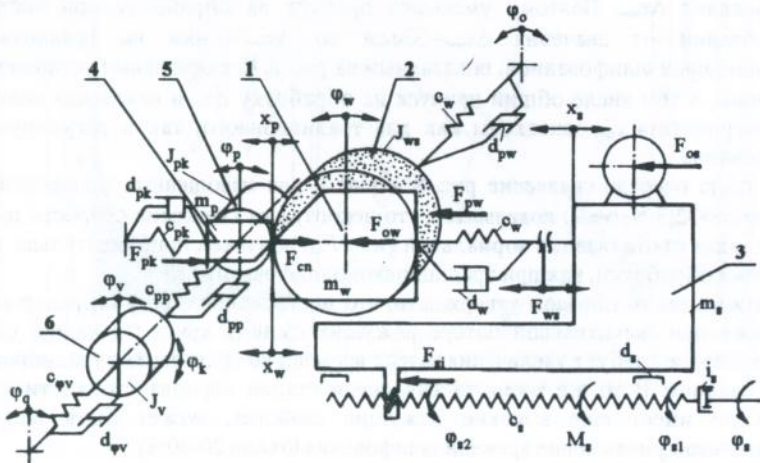


Рис.10. Динамическая модель системы СДИ в процессе врезного шлифования

Для каждой степени свободы записаны уравнения динамики, учитывающие действия всех сил на каждую изолированную массу упругой системы. Проекция сил инерции на направление движения шпиндельной бабки имеет вид :

$$F_{ow} = m_{w0} \omega_{cw}^2 (e_o + e_w) \sin \varphi_{cw} + 2m_{w0} e_o \omega_{cw} \sin \varphi_{cw} \dot{\varphi}_w + m_{w0} e_o \cos \varphi_{cw} \ddot{\varphi}_w \quad (25)$$

где: e_o, e_w - значения эксцентриситета масс шпинделя и биени в подшипниках,

$m_{w0}, \varphi_{cw}, \omega_{cw}$ - масса, угол поворота и угловая скорость шпинделя.

Полученная система уравнений динамики путем использования преобразований *Laplace'a* приведена к ряду матрично-векторных соотношений между отображениями *Laplace'a* выходных параметров динамических подсистем станка. Для подсистемы шпиндельной группы найдено абсолютное x_w и относительное x_Δ перемещение шпинделя. Они определяются зависимостями:

$$(26) \quad x_w(s) = \begin{bmatrix} W_{wn} & W_{ws} & W_{wo} & W_{wp} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{cn}(s) \\ \varphi_s(s) \\ \varphi_o(s) \\ F_{os}(s) \end{Bmatrix}$$

$$(27) \quad x_\Delta(s) = \begin{bmatrix} W_{xw\Delta n} & W_{w\Delta s} & W_{w\Delta o} & W_{w\Delta p} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{cn}(s) \\ \varphi_s(s) \\ \varphi_o(s) \\ F_{os}(s) \end{Bmatrix}$$

где: $F_{cn}(s)$ - отображение по Laplace'у динамической составляющей нормальной силы шлифования,

φ_s - угол поворота вала шагового двигателя,

φ_o - пульсация угла поворота электродвигателя привода главного движения,

F_{ov} - вибрационная нагрузка на шпиндельную бабку со стороны электродвигателя.

Для динамической подсистемы заготовки также найдена зависимость смещения детали x_p от входных параметров:

$$x_p(s) = \left[W_{pn}, W_{pR}, W_{pq} \right] \begin{Bmatrix} F_{cn}(s) \\ \Phi_k(s) \\ \Phi_q(s) \end{Bmatrix} \quad (28)$$

где: Φ_k - отвечает входному параметру в форме случайных колебаний, обусловленных поперечными колебаниями передачи привода вращения заготовки,

Φ_q - случайный входной параметр, обусловленный пульсациями угла поворота вала приводного электродвигателя с учетом возмущений, вносимых колебаниями ремней первой передачи привода вращения заготовки.

Выполнен анализ взаимодействия единичного абразивного зерна с поверхностью детали. Глубина и форма нанесенной риски изменяется за счет деформируемости закрепления и зависит от формы детали и скорости ее вращения.

Профиль поперечного сечения канавки аппроксимируется трапецией. Зависимость площади срезаемого слоя металла от времени получена в виде полинома:

$$S_a = \sum_{n=1}^6 a_n t^n \quad (29)$$

где: a_n - постоянные величины

Нестационарная элементарная сила резания найдена путем решения дифференциального уравнения, учитывающего задержку во времени силы резания относительно изменения площади срезаемого слоя металла. Интегрирование ее по времени дало возможность найти значение импульса элементарной силы резания в виде:

$$K_{Nij} = \sum_{n=1}^7 b_n t_v^n \quad (30)$$

где: b_n - коэффициенты, определяемые параметрами процесса,

t_v - общее время взаимодействия абразивного зерна с поверхностью заготовки.

Выражение импульса элементарной силы резания линеаризовано путем разложения в ряд Taylor'a, в результате получена в явном виде зависимость импульса силы от динамических параметров процесса резания:

$$K_{Nij} \approx K_{Nij0} + \sum_x \frac{\partial K_{Nij}}{\partial x} x, \quad x = x_w, x_p, v_s, \delta r, \delta R \quad (31)$$

где: x_w - смещение шлифовального круга,
 x_p - смещение заготовки,
 v_s - скорость движения шлифовальной бабки,
 δr - изменение радиуса заготовки,
 δR - изменение радиуса круга.

Частные производные, определяющие импульс силы, связаны с коэффициентами зависимости:

$$\frac{\partial K_{Nij}}{\partial x} = \sum_{n=1}^7 t_v^n \frac{\partial b_n}{\partial x} + b_n n t_v^{n+1} \frac{\partial t_v}{\partial x}, \quad x = x_w, x_p, v_s, \delta r, \delta R \quad (32)$$

Определение суммарной силы резания во взаимосвязи с динамическими параметрами процесса выполнено путем статистического суммирования элементарных сил резания на отдельных зернах круга. В качестве базовых статистических параметров приняты среднее расстояние между отдельными зернами и средняя высота зерна над уровнем связки. Шлифовальный круг разбивается на N_x элементарных дисков, для каждого из которых задан упрощенный закон распределения расстояний между зернами в виде пятиразрядной гистограммы суммарная для всех зерен сила резания определена как случайная величина:

$$F_{cn} = \sum_{j=1}^{N_x} \sum_{i=1}^5 P_{ij} K_{Nij} / t_{vc} \quad (33)$$

где: P_{ij} - вероятность наличия расстояния между зернами круга, отвечающая i -му разряду гистограммы для j -ого диска,
 t_{vc} - среднее значение времени взаимодействия зерна с поверхностью детали,
 K_{Nij} - значение элементарного импульса силы.

Найдена зависимость статистических характеристик силы резания от постоянных и переменных во времени параметров процесса. Установлено, что сила резания может быть определена как сумма случайной F_{cn2} и детерминированной F_{cn1} , составляющих, причем детерминированная составляющая является математическим ожиданием силы резания и зависит от геометрических параметров процесса. Получена она в виде матрично-векторного соотношения по Laplace'y:

$$F_{cn1}(s) = \bar{F}_{cn}(s) \left[W_{pxw}, W_{pxp}, W_{pr}, W_{pR} \right] \begin{Bmatrix} x_w(s) \\ x_p(s) \\ \delta r(s) \\ \delta R(s) \end{Bmatrix} \quad (34)$$

где: компоненты матрицы-строки представляют собою соответствующие передаточные функции и определяются, в частности, статистическими параметрами распределения размеров зерен, их размещения по периферии круга и скорости резания.

Математические модели шпиндельной группы, динамической системы заготовки и процесса резания объединены в общую математическую модель, приведенную в виде блок-схемы на рис.11.

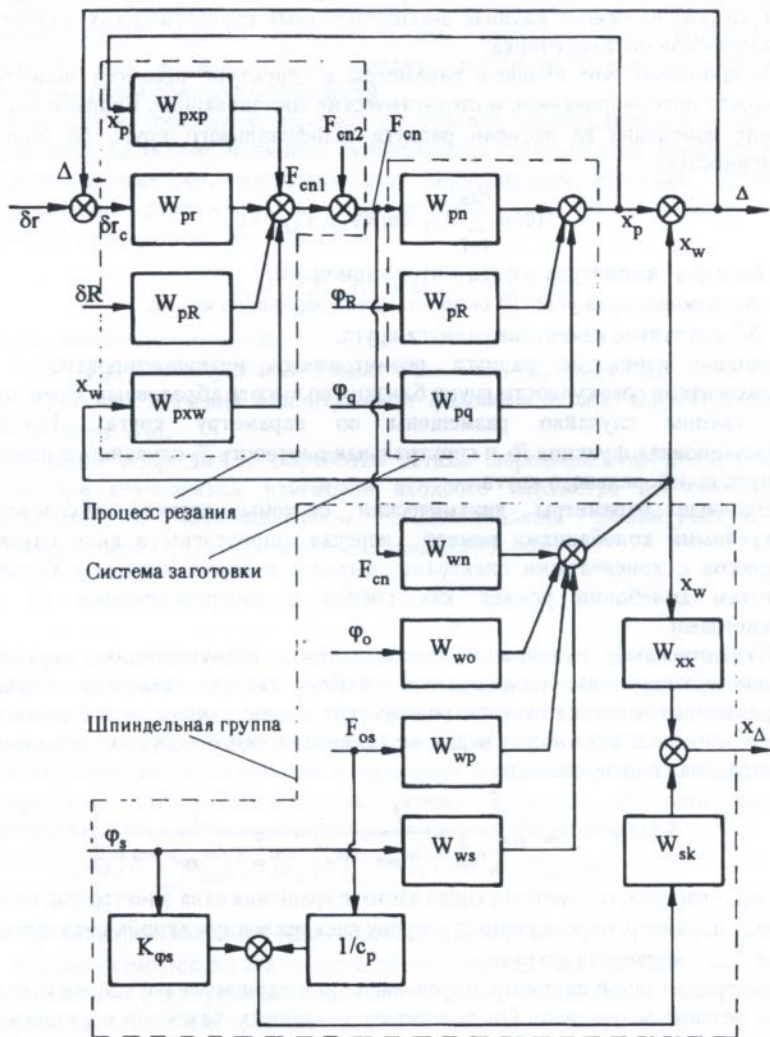


Рис.11. Структурная схема общей математической модели системы СДИ

Входы модели соответствуют независимым входным параметрам. Выходом модели Δ является отклонение формы детали от базовой цилиндрической

поверхности, а также дополнительный вход в виде относительного смещения шпинделя в горизонтальной плоскости x_d . Относительное смещение используется для коррекции алгоритма управления системы NC .

Здесь же рассмотрены способы совершенствования процесса врезного шлифования на основе анализа высокочастотных стохастических колебаний в динамической системе станка.

Установлено, что входные параметры в структуре процесса шлифования содержат детерминированные и стохастические составляющие. Входной параметр в виде изменения во времени радиуса шлифовального круга δR определен зависимостью:

$$\delta R = \sum_{k=1}^{N_{kp}} \delta_{Rk} \sin(k\omega_w t, \Psi_{Rk}) + \delta_z^* \quad (35)$$

где: δ_{Rk} и Ψ_{Rk} - амплитуда и фаза k -итой гармоники,

ω_w - номинальная угловая скорость шлифовального круга,

δ_z^* - случайное изменение радиуса круга.

Случайное изменение радиуса геометрически интерпретировано в виде эквивалентной совокупности групп близких по высоте абразивных зерен, причем эти группы случайно размещены по параметру круга. Определена корреляционная функция R_δ и спектральная плотность S_δ случайного изменения радиуса шлифовального круга.

Входные параметры динамической системы станка, обусловленные поперечными колебаниями ремней передач, определены в виде случайных процессов с линейчатыми спектрами, частоты которых кратны собственным частотам колебаний ремней как систем с распределенными по длине параметрами.

Существенным входным высокочастотным возмущающим параметром, воздействующим на шпиндельную бабку станка, является случайная вибрационная нагрузка от электродвигателя главного движения. Эта нагрузка имеет резонансные свойства и для ее математического списания использована спектральная плотность вида:

$$S_{pos}(\omega) = \omega_m \sigma_{pos}^2 \left[\frac{1}{\omega_m^2 + (\omega_{pos} - \omega)^2} + \frac{1}{\omega_m^2 + (\omega_{pos} + \omega)^2} \right] \quad (36)$$

где: ω_{pos} - частота, соответствующая частоте вращения вала электродвигателя,

ω_m - параметр, определяющий ширину спектра возмущающих воздействий,

σ_{pos}^2 - дисперсия нагрузки.

Рассмотрен входной параметр, определяющий независимое случайное изменение силы резания во времени. Он зависит от различных факторов с различной их физической природой. Это, в частности, затупление зерен, загрязнение поверхности круга, изменение условий смазки, разрушение абразивных зерен или связки и т.д.

Учитывая многоплановость зависимости, предложено аппроксимировать случайный входной параметр в виде изменения силы резания "белым" шумом в ограниченном диапазоне частот. При этом значение спектральной плотности

принимается постоянным, а резонансные пики, появляющиеся в спектре силы резания, считаются незначительными в силу их малой энергетики и многочисленности.

Синтез характеристик входных параметров с использованием математической модели высокочастотных стохастических колебательных процессов дал возможность определить высокочастотные характеристики геометрии обработанной поверхности.

Отклонения реального профиля от базовой цилиндрической поверхности определены на основе принципа суперпозиции всех входных параметров. Для входных параметров, имеющих вид периодической функции времени и допускающих разложение в гармонический ряд, составляющая ошибки обработки определена зависимостью :

$$\Delta_i = \sum_{k=1}^{N_x} X_{ak} W_i \sin(k\omega_w t + \Psi_{ak} + \Psi_i) \quad (37)$$

где: N_x - число гармоник ряда,

X_{ak} , Ψ_{ak} - амплитуда и начальная фаза k -той гармоники входного сигнала, W_i и Ψ_i - значения амплитудно- и фазово-частотной характеристик при частоте $k \omega_w$

Значение погрешности обработки детали (переходной процесс), имеющей место при ступенчатом изменении входного параметра от нуля до X_{aio} , определено с использованием действительной амплитудно-частотной характеристики $U_i(\omega)$ в соответствии с зависимостью :

$$\Delta_i = \frac{2X_{aio}}{\pi} \int_0^{\infty} U_i \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega \quad (38)$$

где: значение интеграла находится путем численного интегрирования, при произвольном изменении входного сигнала эта погрешность находится путем численного интегрирования интеграла Дуамеля-Карссона (свертки) с использованием ранее определенного переходного процесса.

Статистические характеристики случайных изменений радиуса обработанной поверхности также найдены на основе принципа суперпозиции. Так спектральная плотность изменения радиуса определена суммой :

$$S_{\Delta}(\omega) = \sum_{x_i} |W_{\Delta x_i}(j\omega)| S_{x_i}(\omega), \quad x_i = \delta R, \varphi_0, F_{cn2}, \varphi_k \quad (39)$$

где: S_{x_i} - спектральная плотность входного параметра,

$W_{\Delta x_i}(j\omega)$ - комплексно значимая частотная передаточная функция.

По значению спектральной плотности путем численного интегрирования найдены дисперсия и корреляционная функция изменения радиуса:

$$\sigma_{\Delta}^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S_{\Delta}(\omega) d\omega, \quad R_{\Delta}(\tau) = \int_0^{\infty} S_{\Delta}(\omega) \cos \omega \tau d\omega \quad (40)$$

В результате определена зависимость радиуса r_m обработанной поверхности от угла поворота заготовки φ_p . Она имеет вид :

$$r_m = r_o - \delta r_m + \sum_{k=1}^N \delta_{rkm} \sin(k\varphi_p + \Psi_{krm}) + \Delta_{rm}^* \quad (41)$$

где: индекс $m = 1, 2, 3, \dots$ отвечает номеру оборота заготовки в момент выстоя,

r_o - постоянное значение радиуса,

δr_{om} - детерминированное уменьшение радиуса, обусловленное смещением шпиндельной бабки под воздействием системы НС,

δ_{rkm}, Ψ_{krm} - а мплитуды радиуса под влиянием периодических входных парамплитуды и фазы k -той гармоники, отвечающие изменаметров,

Δ_{rm}^* - случайные изменения радиуса, характеризующиеся корреляционной функцией.

• Экспериментальные исследования адаптивного регулирования процесса врезного шлифования

Полученные результаты исследований цифровой симуляции использованной стратегии нормальной силы шлифования были в дальнейшем проверены в ходе экспериментальных исследований. Для этого в систему цифрового управления шлифовальным станком ROPA16.50SA производства механического завода в Тарнове был введен компьютер с соответствующими периферийными системами (hardware). Преобразование сигналов измерения и регулирование процесса осуществлялось компьютером, оснащенным специальными программными модулями (software).

Результаты экспериментальных исследований позволяют утверждать:

- Использование системы регулирования нормальной силы шлифования для автоматического распознавания момента первого касания шлифовального круга с заготовкой требует задания порогового значения этой силы w_{fp} , по достижении которого производится переключение ускоренного подвода круга на режим собственно регулирования. В настоящей работе предложен способ автоматического задания пороговой силы в процентном соотношении с силой чернового шлифования ($w_{fp} = \%w_{fz}$). Такое решение предохраняет от мгновенной перегрузки шлифовального круга, особенно при обработке эксцентричных заготовок. Предложенное автоматическое распознавание первого касания круга с обрабатываемой заготовкой позволяет исключить „шлифование воздуха” и уменьшить время цикла обработки даже до 30% без необходимости закупки специального для этого приспособления.

- В результате изменения режущих свойств шлифовального круга в течение периода его стойкости коэффициент α нормальной силы изменяется в пределах 20-30% от своего начального значения (после правки круга). Поэтому для точной стабилизации силы F_{cn} необходимо вводить изменения параметров регулятора на основе идентификации процесса в режиме *on-line*.

Идентификация параметров процесса шлифования может быть признана лишь после того, как был зарегистрирован момент касания круга с деталью. Вместе с тем должна быть обеспечена полная ширина шлифования, что не всегда имеет место в начале обработки, например, при конусности у заготовки. В этом случае может быть произведена идентификация в более поздней стадии обработки,

например, при переходе от черного к чистовому шлифованию. Исходя из медленнотекущего характера потерь кругом режущих способностей компенсирующее изменение параметров регулятора может производиться не чаще, чем по окончании каждого цикла.

- Для стабилизации нормальной силы на последовательных этапах цикла обработки принято, что скорость врезной подачи круга v_f будет изменяться не чаще, чем один раз на один оборот детали. Это имеет особое значение в случае начальной фазы шлифования эксцентричных заготовок. Таким образом для расчета погрешности регулирования e_f принимается максимальное значение измеренной силы $F_{сн}$ за время первого оборота заготовки. Это позволяет избежать копирования первоначальных погрешностей формы заготовки. Следует, однако, заметить, что для нахождения этого значения нормальной силы необходимо не менее 4-х регистраций на один оборот изделия, в то время как регулятор силы может быть установлен на время такта $T_o = T_w$ (T_w - время одного оборота детали).

- При использовании предложенной в работе стратегии регулирования нормальной силы помимо повышения производительности обработки получено значительное уменьшение поля разброса значений параметров качества обработанных деталей. В результате непрерывной адаптации врезной подачи круга для стабилизации нормальной силы независимо от возможных возмущений процесса для серии деталей, обрабатываемых в течение периода стойкости шлифовального круга, стабилизируются условия обработки на последней стадии чистового шлифования. Это касается, в частности, упругих деформаций системы СДИ и тепловых явлений в резании. Кроме того, в отличие от традиционного шлифования, стадия чистового шлифования проходит в этом случае в условиях квазистационарной фазы производительности шлифования. Эта стабилизация условий обработки в заключительной фазе чистового шлифования определяет непосредственно величины параметров качества обработанных деталей, таких, как шероховатость поверхности, отклонения от цилиндричности (некруглость), точность диаметральных размеров. При этом обеспечивается не только уменьшение погрешности этих величин, но и уменьшение поля их рассеивания по сравнению с традиционным шлифованием.

- Идентификация коэффициента нормальной силы α была использована также для определения периода стойкости шлифовального круга. В случае, когда этот показатель достигает своего установленного граничного значения α_g , система регулирования обрабатывает сигнал, включающий процесс правки круга после окончания цикла шлифования.

В представленных в конце работы результатах технологических исследований отражено влияние величины регулируемой нормальной силы шлифования на протекание радиального изнашивания шлифовального круга, объемной производительности и основного времени шлифования, шероховатости поверхности детали, обработанной шлифовальными кругами с различными характеристиками.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана теоретически и проверена экспериментальными и симуляционными исследованиями новая стратегия адаптивного управления процессом многоступенчатого врезного шлифования, осовой которой является стабилизация нормальной силы шлифования на заданных уровнях для последовательных этапов процесса путем управления скоростью врезной подачи шлифовального круга с учетом изменения его режущих свойств в пределах периода стойкости.

2. Разработана математическая цифровая модель процесса шлифования, параметры которой непрерывно идентифицируются в процессе обработки с помощью сигналов измерений пути подачи шлифовального круга, съема радиального припуска на обработку и нормальной силы шлифования в текущем времени.

3. На основании разработанной стратегии создана гибкая адаптивная система, управляемая компьютером, который осуществляет синтез системы регулирования и корректирование установочных параметров регулятора в соответствии с реальными характеристиками процесса. При первой настройке (после смены шлифовального круга или обрабатываемых деталей) станок работает в традиционном цикле шлифования, что дает первую исходную информацию о новом процессе, на основании которой автоматически производится предварительная оценка характеристик процесса и назначение установочных параметров регулятора, которые впоследствии автоматически корректируются после каждого цикла обработки.

4. Разработана и заложена в систему регулирования методика исключения влияния на процесс возмущений с большой амплитудой во избежание дальнейшего технологического копирования погрешностей формы заготовки (некруглости, эксцентриситета поверхности, наличия шпоночных или шлицевых канавок и др.); разработана для этого специальная стратегия измерения максимальной нормальной силы шлифования с последующим изменением скорости врезной подачи с частотой, равной частоте вращения заготовки.

5. Разработана и введена в систему регулирования методика автоматической фиксации первого касания шлифовального круга с деталью через измерение величины нарастания нормальной силы шлифования и сравнения измеренных значений с заданными пороговыми; это позволило исключить внутрицикловые потери на "шлифование воздуха".

6. Для анализа высокочастотных стохастических колебательных процессов в динамической системе станка использована специальная математическая модель, учитывающая малые поперечные колебания шпинделя и заготовки, при этом процесс резания при шлифовании представляется в виде двух блоков, один из которых имеет детерминированные характеристики, зависящие от

параметров колебаний, а другой отражает случайные флуктуации силы резания и является внешним воздействием на динамическую систему станка.

7. Высокочастотные стохастические колебательные процессы определяются детерминированным и случайными входными воздействиями, в числе которых изменение радиуса шлифовального круга, вибрационные нагрузки от электродвигателя привода главного движения, нагрузки, обусловленные колебаниями ремней передач, и случайные флуктуации силы резания. Высокочастотные колебания определяют зависимость радиуса обработанной поверхности от угла поворота заготовки. Средний по длине детали текущий радиус обработанной поверхности зависит от номера оборота заготовки, причем для первого после выстоя оборота детали радиус представляет собой центрированный случайный процесс, а для последующих оборотов радиус кроме случайной составляющей имеет также детерминированную составляющую в виде суммы периодической части, определенной гармоническим рядом, и нестационарной переходной части. Это обуславливает влияние высокочастотных колебаний на результирующий профиль обработанной поверхности в виде изменения радиуса в пределах $10 + 30\%$ от общего поля допуска нецилиндричности обработанной поверхности детали.

8. Эспериментальные исследования и опыт производственной эксплуатации систем адаптивного управления процессом шлифования на основе предложенной стратегии показали:

- стабилизация нормальной силы на последовательных этапах процесса позволяет резко сократить неустановившиеся фазы производительности шлифования и значительно уменьшить припуск на чистовое шлифование, что обеспечивает сокращение цикла шлифования до 20-30%;
- использование предложенной стратегии в системе автоматического регулирования с целью исключения фазы "шлифования воздуха" позволяет дополнительно сократить цикл шлифования в ряде случаев даже до 30% без дополнительных затрат на специальное оборудование станка,
- высокая точность стабилизации нормальной силы на этапе чистового шлифования способствует значительному (до 50%) уменьшению поля рассеивания погрешностей размеров и шероховатости обработанных поверхностей, непрерывная идентификация процесса шлифования дала возможность автоматического определения периода стойкости шлифовального круга и автоматического включения процесса его правки.

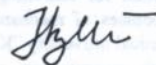
9. Разработанная система адаптивного регулирования процесса шлифования прошла производственные испытания на Тарновском механическом заводе и принята для оснащения выпускаемых там шлифовальных станков типа ROPA16.50SA. На Международной ярмарке в Познани 1992 г. станок с системой управления SA-20 был удостоен золотой медали.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] Burek J.: Obrabiarki. WPRz, Rzeszów 1986, s. 180.
- [2] Burek J.: Kinematyka obrabiarek. WPRz, Rzeszów 1991, s. 218.
- [3] Burek J., Batsch A.: Efektywność wielostopniowego procesu szlifowania wglębnego wałków z zastosowaniem układu ACC. Międzynarodowa Konferencja AC'85, Rydzyna 1985, s. 66-79 (автором выполнено 90% работы).
- [4] Burek J., Batsch A., Bilo T.: Układ sterowania ACC w zastosowaniu do szlifierki ROPA 16.50SA. IX Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej. Kraków 1986, s. 67-74 (автором выполнено 50% работы).
- [5] Burek J., Bilo T.: Szlifierka ROPA 16.50 SA z cyfrowym układem sterowania adaptacyjnego wielostopniowym procesem szlifowania. Sprawozdanie z pracy U-1212 dla Zakładów Mechanicznych w Tarnowie. Rzeszów 1986, s. 95, tab 7, rys 120 (автором выполнено 70% работы).
- [6] Burek J., Bilo T.: Projekt i wykonanie układu sterowania adaptacyjnego dla szlifierki ROPA 16.50 SA. . Sprawozdanie z pracy U-1766 dla Zakładów Mechanicznych w Tarnowie. Rzeszów 1987, s. 60, rys 75 (автором выполнено 70% работы).
- [7] Burek J.: Adaptives Grenzregel-System für mehrstufiges Aussenrund-Einstech - schleifen. Werkstatt und Betrieb 121(1988)2, s. 117-120.
- [8] Burek J.: Dokumentacja techniczno - ruchowa i badania wdrożeniowe układu sterowania adaptacyjnego SA-20 dla szlifierki ROPA 16.50 SA. . Sprawozdanie z pracy U-1855 dla Zakładów Mechanicznych w Tarnowie. Rzeszów 1988, s. 120, rys 32.
- [9] Oczóś K. E., Burek J.: Sterowanie adaptacyjne wielostopniowym cyklem szlifowania wglębnego. Mechanik 66(1992)7, s. 237-240 (автором выполнено 80% работы).
- [10] Oczóś K. E., Burek J.: Sterowanie dosuwem ściernicy do obrabianego przedmiotu Mechanik 66(1992)8-9, s. 277-279 (автором выполнено 80% работы).
- [11] Oczóś K. E., Burek J.: Efektywność cyklu wielostopniowego szlifowania wglębnego. Przegląd Mechaniczny 52(1993)13, s. 7-10 (автором выполнено 60% работы).
- [12] Burek J., Oczóś K. E.: Obciążanie ściernicy na szlifierce do wglębnego szlifowania skośnego. XVI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Kraków, 1994, s. 157-167 (автором выполнено 70% работы).
- [13] Burek J.: Wpływ kąta wcinania na efektywność wglębnego szlifowania skośnego. Przegląd Mechaniczny 53(1994)14, s. 17-19
- [14] Burek J.: Strategie odciążania wrzeczona ściernicy podczas szlifowania z regulowaną siłą normalną. Postępy technologii maszyn i urządzeń. 19(1995)4, s. 6-22.
- [15] Burek J.: Dosuw ściernicy do obrabianego przedmiotu w zautomatyzowanym cyklu obróbkowym. Przegląd Mechaniczny 55(1996)10, s.18-22.
- [16] Burek J., Oczóś K. E.: Wielostopniowy proces szlifowania wglębnego jako niestacjonarny obiekt sterowania adaptacyjnego. Mechanik 67(1994)12, s. 429-433. (автором выполнено 80% работы).
- [17] Burek J., Oczóś K. E.: Nadzorowanie procesu szlifowania wglębnego przy regulacji siły normalnej. Mechanik 69 (1996) 12, s. 506-509 (автором выполнено 80% работы).
- [18] Burek J.: Pomiar parametrów procesu szlifowania dla realizacji sterowania adaptacyjnego (AC). Pomiary Automatyka Kontrola 43 (1997)2, s. 36-38.

- [19] Burek J., Oczos K.E.: Digital control system for cylindrical plunge grinding process. Postępy technologii maszyn urządzeń. PAN, 1 (1997) s. 73-88 (autorem wykonano 70% roboty).
- [20] Burek J.: Adaptacyjne szlifowanie wglębne przedmiotów wykazujących mimośrodowość. Przegląd Mechaniczny. 56(1997)8, s. 18-22.
- [21] Burek J., Lubimov W.: Система адаптивного управления технологическим процессом врезного многоступенчатого круглого шлифования. 3-я Украинська конференція з автоматичного керування „Автоматика 96”. Севастополь, 1996, с. 105 (автором выполнено 50% работы).
- [22] Patent RP Nr259665: Układ napędowy posuwu wglębnego wrzeciennika ściernicy. (Burek J.)
- [23] Patent RP Nr266784: Układ adaptacyjnego sterowania wielostopniowym cyklem procesu szlifowania wglębnego. (Burek J.)
- [24] Patent RP Nr259668: Sposób i układ do eliminacji szlifowania strefy powietrza. (Burek J.)
- [25] Patent RP Nr270329: Sposób i układ do określania i zadawania siły normalnej, stosowany zwłaszcza w wielostopniowym procesie szlifowania wglębnego wałków. (Burek J.)
- [26] Patent RP Nr297270: Sposób i układ do automatycznego obciążania ściernicy. (Burek J.)
- [27] Patent RP Nr297267: Sposób i układ do eliminacji szlifowania strefy powietrza oraz skrócenia fazy niestacjonarnej wydajności szlifowania zgrubnego. (Burek J.)
- [28] Patent RP Nr297290: Czujnik pomiarowy zużycia promieniowego ściernicy. (Burek J.)

Соискатель: Burek J.



АНОТАЦІЯ

Бурек Ян : Адаптивне регулювання процесом візного шліфування валів. Дисертація на здобуття вченого ступеню доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.01. -Процеси механічної та фізико-технічної обробки, верстати і інструменти. Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", Київ, 1997.

В праці представлено новий підхід до оптимізації ступінчатого циклу візного шліфування валів. Теоретично опрацьовано та практично перевірено методами комп'ютерної симуляції і експериментальними дослідженнями стратегію адаптивного регулювання нормальної сили шліфування, яка бере під увагу збурення, що вони можуть виникати в цьому процесі. В той же час вона має мінімально-часовий характер. Це гарантує стабільну якість викінчування деталей під час періоду стійкості шліфувального круга. З цією метою побудовано складну теоретичну цифрову модель шліфування, яку пізніше було спрощено таким чином, щоб уможливити ідентифікацію її параметрів на підставі сигналів вимірювань таких характеристичних величин процесу, як-то шлях посуву шліфувального круга, зняття припуску на обробку і нормальна сила шліфування. Модель, що її було розроблено, була використана для синтезу самоналаджуваної цифрової системи регулювання процесу шліфування. Результати, які були отримані під час досліджень, уводять, що використання стратегії адаптивного регулювання, що була опрацьована в цій роботі, дозволяє на значне скорочення часу циклу обробки і в той же час забезпечує високу повторюємість показників якості оброблених деталей в порівнянні з традиційним процесом шліфування, який використовується у виробничій практиці до цього часу.

Ключові слова: візне шліфування, адаптивне регулювання, ідентифікація процесу, оптимізація циклу обробки.

ANNOTATION

Burek Jan : Adaptive regulation of the cylindrical plunge grinding process. The dissertation for searching of academic degree of Doctor of technical sciences on speciality 05.03.01-processes of mechanical and physic-technical processing,machines and tools.The national Ukraine technical university "Kiev politechnical institute", Kiev,1997.

The work presents new possibilities in respect to multistage cylindrical plunge grinding cycle optimization.The strategy for normal grinding force adaptive regulation has been developed theoretically,and then verified by computer simulation and experimental tests.This strategy,taking into account all the disturbances existing in the grinding process,has minimum-time character, and provides reproducible quality of the finished workpieces during grinding wheel life.For this reason, the comprehensive theoretical digital model of the grinding process has been developed.Then, the model has been simplified,so that its parameters can be identified experimentally, basing on signals from measurements such characteristic amounts of the process as feed distance of the wheel, decrease in grinding allowance,and normal grinding force. This model was used in synthesis of self-adjusting digital adaptive regulation system ,and in supervision of the grinding process.Obtained results of the tests shows that application of the adaptive regulation strategy, that has been proposed in the work, allows machining cycle time to be considerable shortened, while providing high repeatability of the workpiece quality, as compared with conventional grinding process, that up to now is used in industrial practice.

Key words: plunge grinding , adaptive regulation, proces identification , machining cycle optimization.

433480

AV 38.286