

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ КОЛЕЦ  
ПОДШИПНИКОВ  
НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ  
СИСТЕМЫ ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА  
ПО АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫМ ФУНКЦИЯМ  
ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ**

- **Цель работы:** повышение качества обработки поверхностей качения колец подшипников –
  - однородности физико-механических свойств поверхностного слоя на основе идентификации динамической системы шлифовального станка по автокорреляционным функциям виброакустических колебаний и определении рациональной подачи абразивного круга по запасу устойчивости динамической системы
- 
- **В работе решаются следующие задачи:**
- 1.Обоснование и построение модели динамической системы шлифовального станка в виде передаточной функции
  - 2.Обоснование экспериментально – аналитического метода получения передаточной функции динамической системы шлифовального станка по автокорреляционным функциям виброакустических колебаний технологической системы.
  - 3.Экспериментальные исследования динамических характеристик шлифовальных станков для обработки колец подшипников на различных режимах (подачи круга).
  - 4. Разработка методических рекомендаций управления процессом шлифования на основе оценки динамического состояния станка по стохастическим характеристикам и контроля качества обработки колец для реализации в конкретных производственных условиях

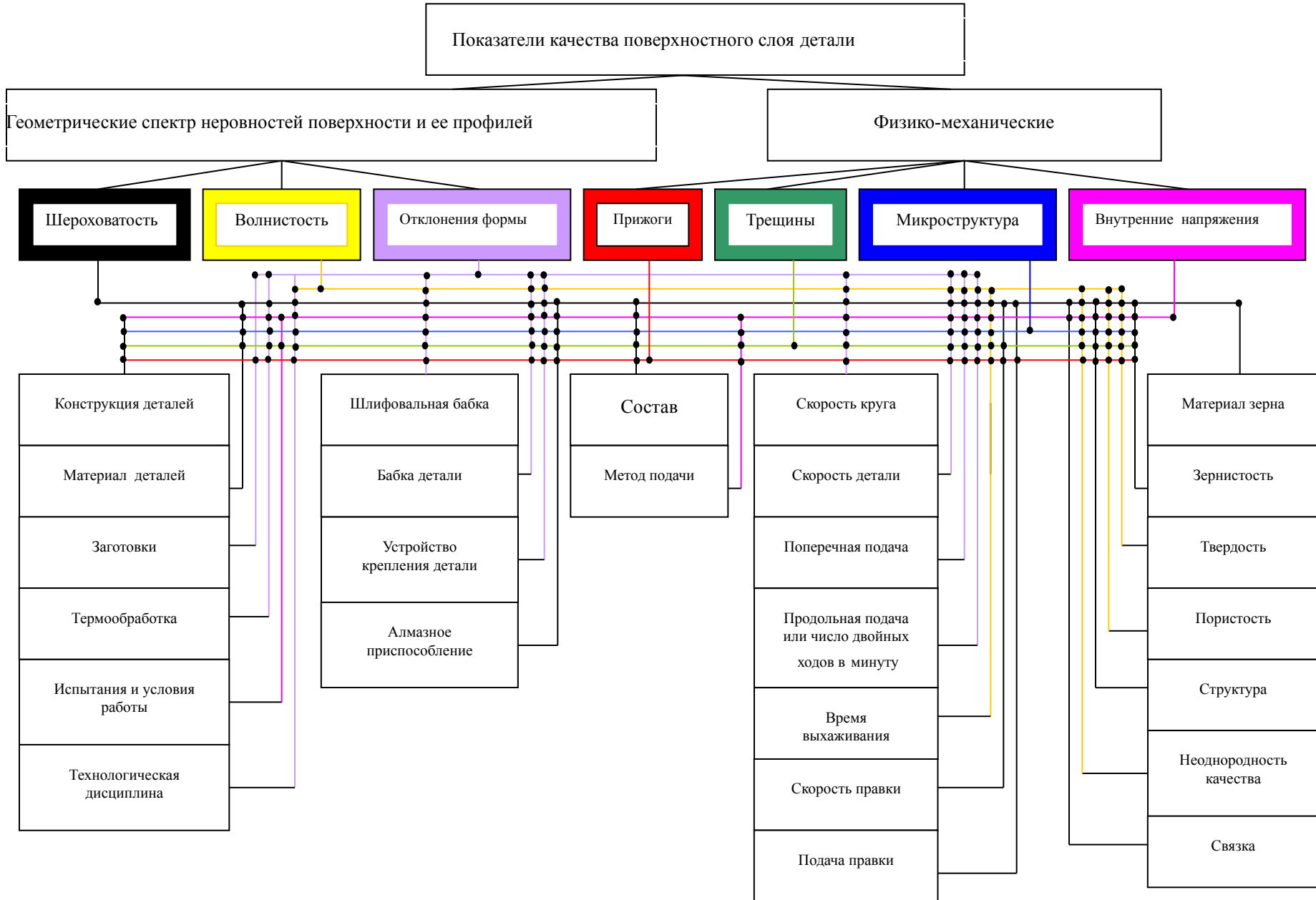
**Научная новизна работы:**

1. Разработан и обоснован метод идентификации динамической системы шлифовального станка при обработке колец подшипников по автокорреляционной функции стохастических виброакустических колебаний основных узлов формообразующей подсистемы при воздействии на динамическую систему сигнала типа «белый шум», и обеспечивающий вычисление передаточной функции замкнутой динамической системы при различных подачах круга.
2. Разработана модель динамической системы шлифовального станка в виде передаточной функции, связывающей силу резания с подачей круга, с использованием уточненной модели съема припуска по кривой, близкой к спирали Архимеда, на основе которой получена частотная функция, позволяющая осуществить компьютерное моделирование спектров регистрируемых колебательных процессов на выходе системы при воздействии на входе силы резания со стохастической компонентой типа «белый шум».
3. Разработано методическое обеспечение для определения рационального режима шлифования колец подшипников по максимальному запасу устойчивости динамической системы при различных подачах круга, на основе выявленной экспериментально связи качества поверхностного слоя с запасом устойчивости ДС, определенным из идентифицированной передаточной функции по критерию Михайлова, и целеориентированное на получение заданной однородности физико–механических свойств поверхностного слоя дорожек качения колец подшипников, определяемой вихретоковым методом.

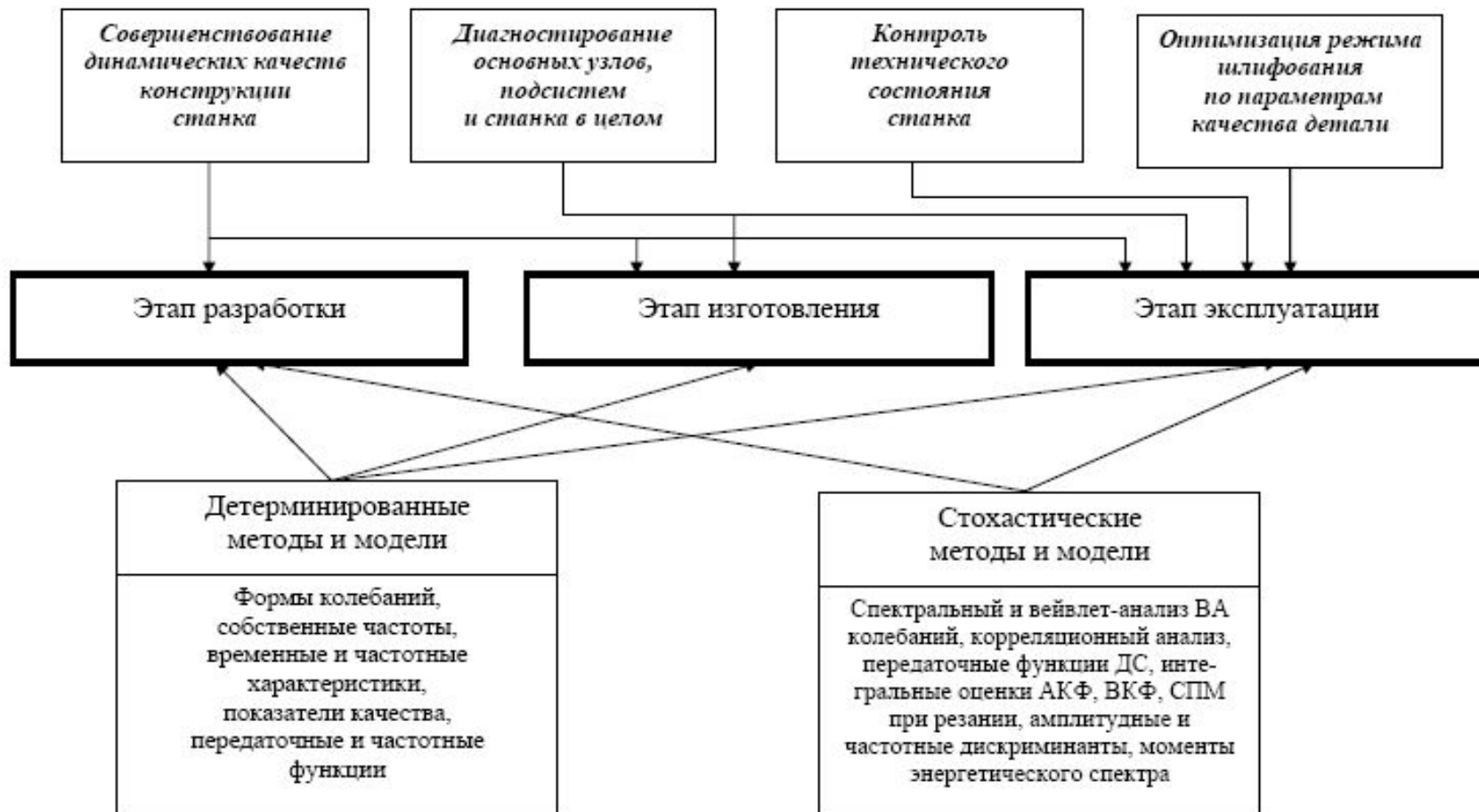
## Положения, выносимые на защиту

1. Обоснован метод идентификации замкнутой динамической системы шлифовального станка в виде передаточной функции по автокорреляционным функциям виброакустических колебаний технологической системы при подаче на вход сигнала типа «белый шум».
2. Обоснована технология построения модели динамической системы шлифовального станка в виде передаточной функции с уточненной моделью съема припуска по кривой, близкой к спирали Архимеда .
3. Методика для определения рациональной подачи круга при предварительном шлифовании колец подшипников по максимальному запасу устойчивости динамической системы, целеориентированная на получение заданной однородности физико–механических свойств поверхностного слоя дорожек качения, определяемой вихретоковым методом.
4. Результаты экспериментальных исследований динамических характеристик шлифовальных станков для обработки колец подшипников и связи запаса устойчивости ДС и качества обработки поверхностного слоя определяемых при различных подачах.
5. Практическая реализация методики выбора рациональной подачи круга при шлифовании колец подшипников по идентифицированной модели ДС, обеспечивающей заданное качество поверхностного слоя и высокую производительность.

# Показатели качества поверхностного слоя деталей в зависимости от условий шлифования



# Детерминированные и стохастические методы обработки результатов измерения вибраакустических колебаний технологической системы

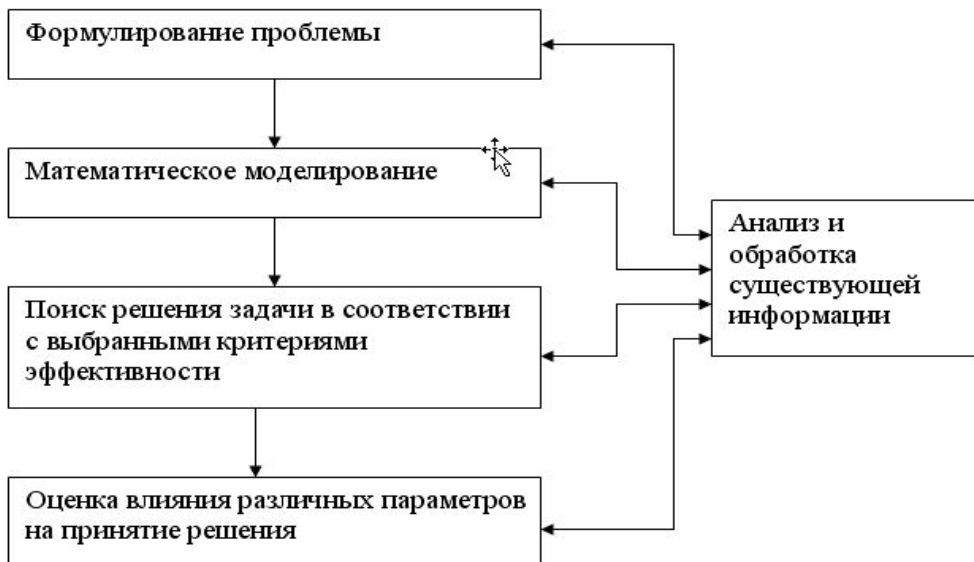


## Методы оптимизации процессов резания

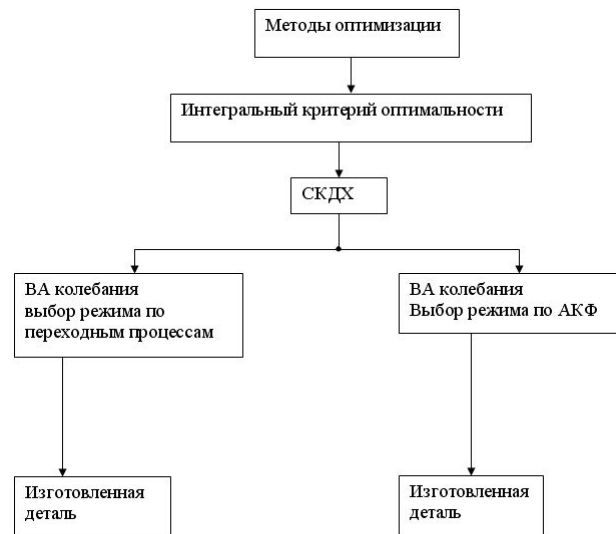


# II Пример оптимизации на токарных станках

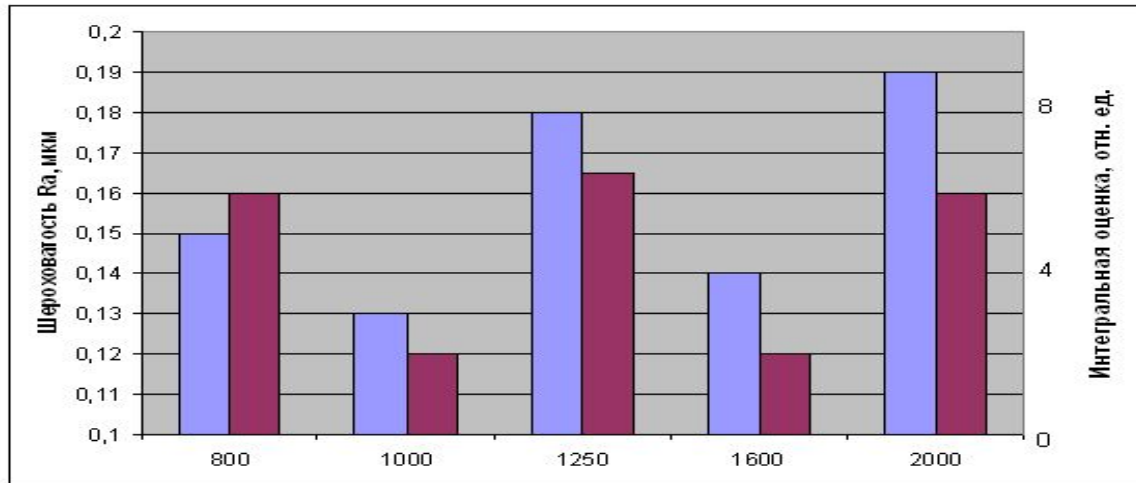
## Схема решения системной задачи



## Оптимизация процесса токарной обработки



**Зависимость интегральных оценок АКФ виброакустических колебаний резцовой головки модуля ТПАРМ – 100М и шероховатости поверхности (Ra) обработанных деталей от скорости вращения шпинделя**

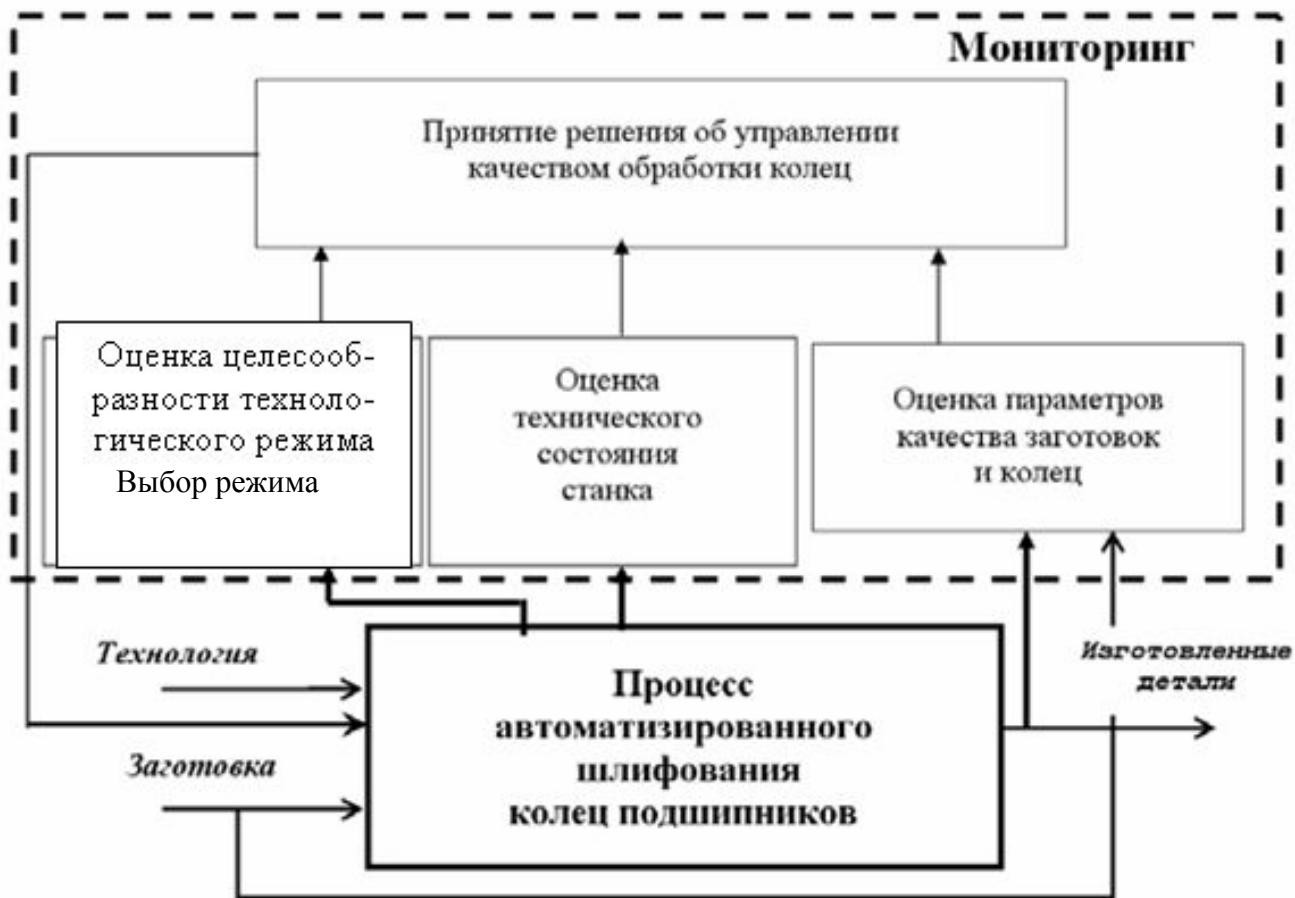


(подача 10 мкм/об, глубина резания 30 мкм, резец АСПК с радиусом по вершине 0,3 мм), где: 1- интегральные оценки АКФ, 2 – шероховатость поверхности.



№ п/п	Вид входного воздействия	Реализация на станках	Основные свойства	Выходные характеристики
<b>1</b>	<b>Гармоническое</b>	Возбуждение колебаний от вибраторов	Большие затраты времени, точен	АФЧХ, АЧХ, ФЧХ
<b>2</b>	<b>Импульсное</b>	Возбуждение колебаний ударом специальным молотком Возбуждение колебаний от математического маятника Электромагнитный возбудитель с обратной связью	Сложность задания параметров импульса, легок в интерпретации Выполнено только на лабораторной установке. На станке не опробовано	АФЧХ, ИПФ, передаточная функция АЧХ при различных углах удара
<b>3</b> 3.1 3.2	<b>Ступенчатое</b> Без резания При резании	Переходной процесс при нагружении через батавскую слезку Переходной процесс при врезании инструмента	Не соответствует реальным условиям, легок в интерпретации Чувствителен к возмущениям, легок в интерпретации	Переходная и передаточная функции Переходная и передаточная функции, запас устойчивости
<b>4</b> 4.1 4.2	<b>Стохастическое</b> Без резания При резании	Возбуждение колебаний от специального вибратора Возбуждение колебаний силой резания с регистрацией спектра и автокорреляционной функции (АКФ)	Не соответствует реальным условиям, сложен в применении, нечувствителен к возмущениям Прост в применении, нечувствителен к возмущениям, приближен к реальным условиям	АФЧХ, АЧХ, передаточная функция Спектр и АКФ при резании, интегральная оценка спектра и АКФ, передаточная функция, степень устойчивости

## Управление качеством шлифования колец подшипников



# Схема влияния параметров технологического режима на качество и долговечность колец подшипников

$$Q = k P_z v_k / 427,$$

где  $k$  - коэффициент, показывающий какая доля механической энергии переходит в тепло ( $k=0,80 \text{ } 0,95$ ),  $P_z$  - тангенциальная составляющая силы резания,  $v_k$  - скорость круга.

$$\Theta_{\max} = 52 \left(1 - b^*\right) \frac{\sqrt{\omega}}{\lambda} \cdot \frac{m^{0.05} P_z v_k}{b \cdot \sqrt{v_s} \beta^{0.4}} \cdot F(\psi, y)$$

где  $b^*$  - коэффициент, характеризующий распределение теплоты между кругом и деталью,

$\lambda, \omega$  - коэффициенты теплопроводности,

$P_z$  - тангенциальная сила шлифования,

$v_k, v_s$  - скорости круга и детали,

$b$  - ширина площадки контакта,

$F(\psi, y)$  - безразмерная функция распределения от  $\psi = x / \beta, y = m \beta^2$   $0 \leq x \leq \beta$ , координата по высоте круга,  $m = 0.01$

0.03 – темп снижения интенсивности теплообразования, зависящий от свойств материалов круга и детали.



Количество и долговечность колец подшипников

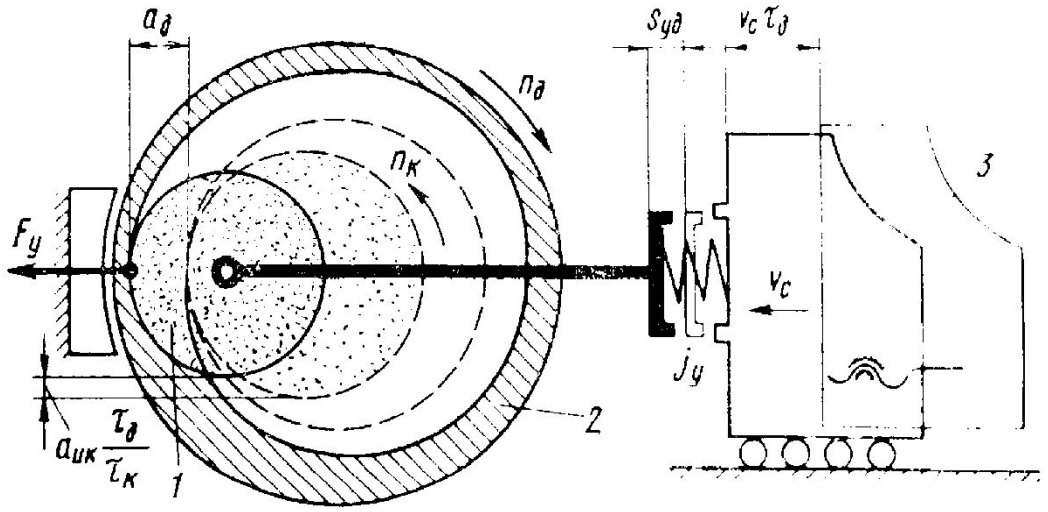
**Основные подсистемы шлифовального автомата и их взаимосвязь**

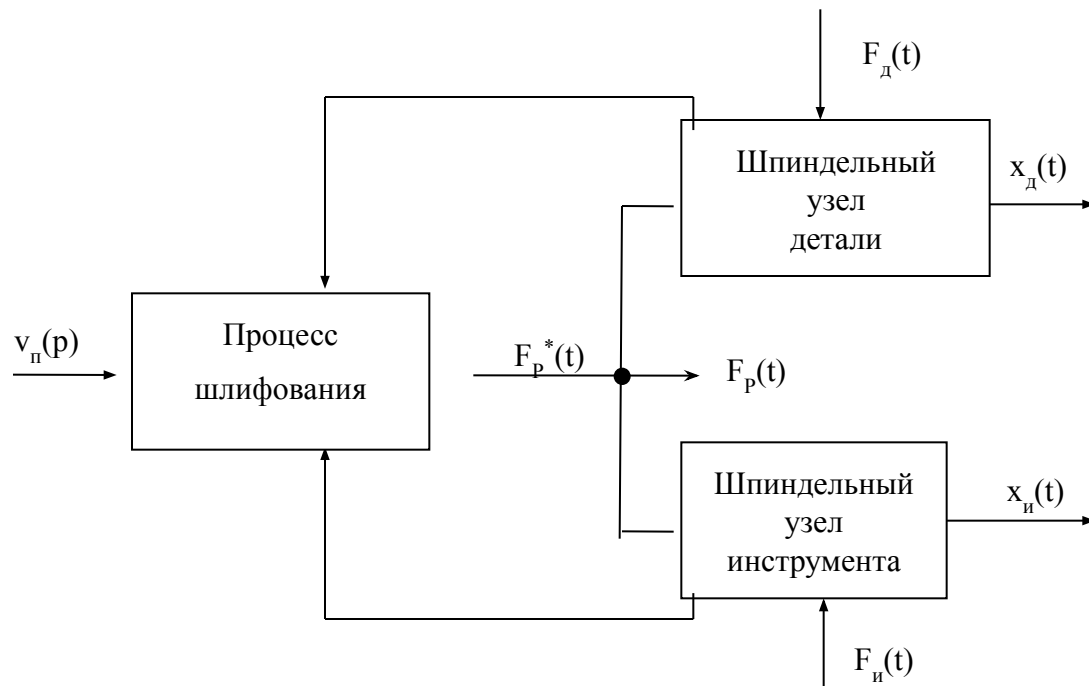


**Модель процесса врезного внутреннего шлифования:**

- 1- шлифовальный круг,
- 2- обрабатываемая деталь,
- 3- суппорт подачи

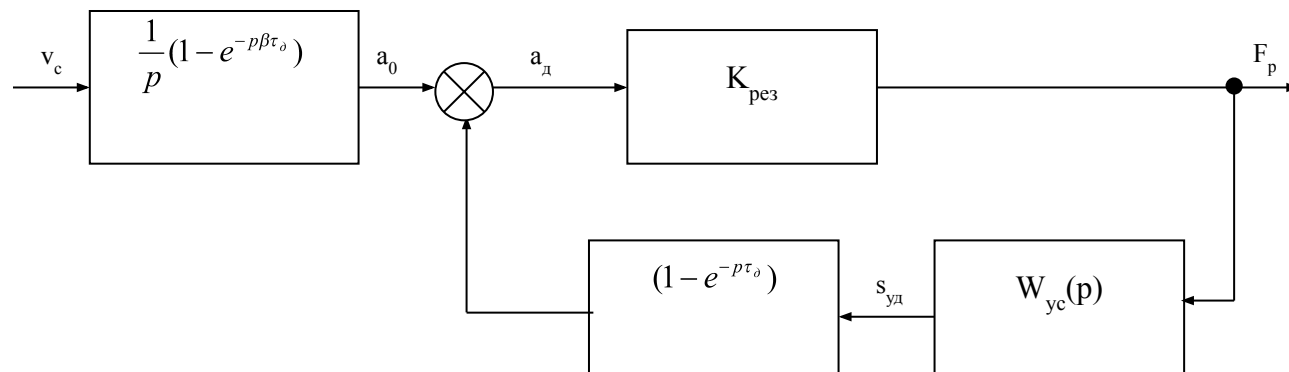
$S_{уд}$  – упругая деформация системы,  
 $\tau_д, \tau_к$  – время оборота детали и круга  
 $a_д$  – снимаемый припуск,  $F_y$  – радиальная составляющая силы резания,  $v_c$  – скорость суппорта поперечной подачи шлифовального круга,  $j_y$  – жесткость упругой системы по координате  $y$





$F_D(p)$ ,  $F_I(p)$  – возмущающие воздействия;  $v_{\Pi}(p)$  – скорость подачи круга;  $F_p(p)$  – сила резания;  $x_D(p)$ ,  $x_I(p)$  – приведенные к плоскости резания смещения ШУ детали и ШУ инструмента.

## Обобщенная структурная схема процесса врезного шлифования (по В. Н. Михелькевичу)



# Уточненная математическая модель динамической системы

## Уточненная модель съема припуска

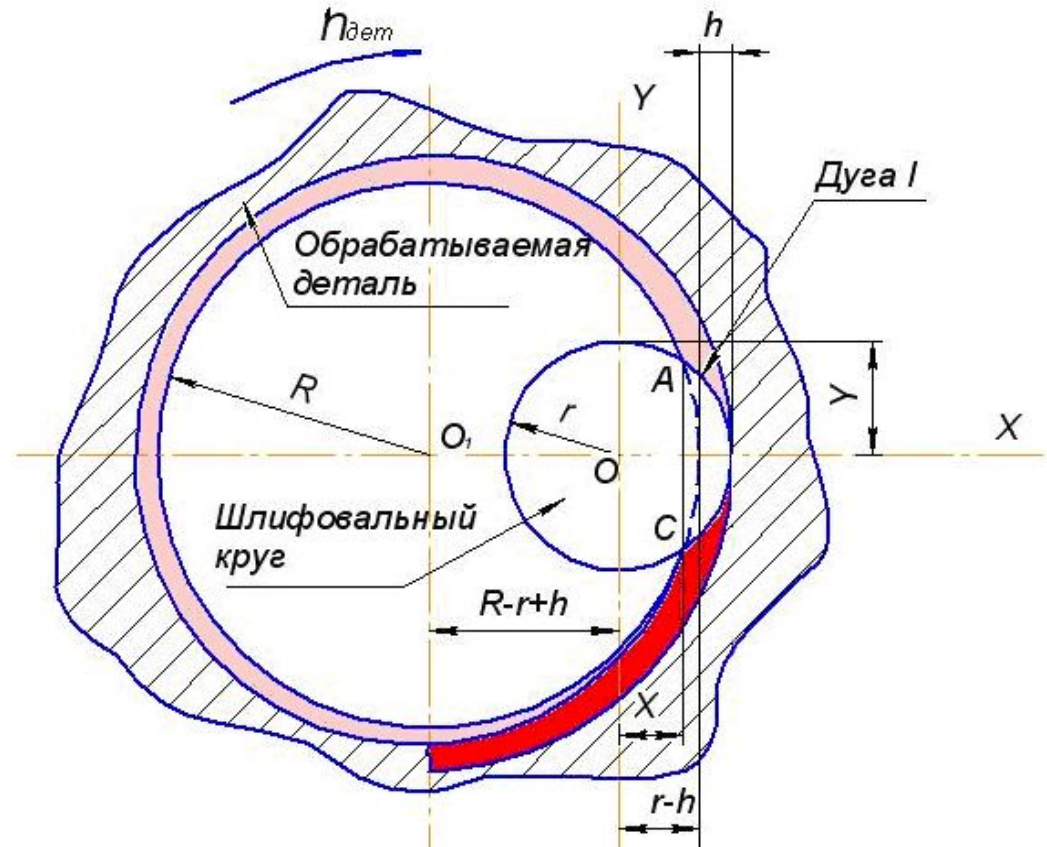
$$S = l \cdot b = r \cdot H \cdot \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{C_1 \cdot (r-h)}{r \cdot (C_1 + 2h)} \right]$$

$$l = r \cdot \arcsin \frac{X}{r} \Big|_{\frac{C_1(r-h)}{C}}^r = r \cdot \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{C_1 \cdot (r-h)}{r \cdot (C_1 + 2h)} \right]$$

$$N = V \cdot F_Y = K_{ун} \cdot \left[ r_0 + V_c \cdot \left( n_t + \frac{\varphi}{2\pi} \right) \right] \cdot F_Y \cdot \omega$$

$$V = r \cdot \omega = \left[ r_0 + V_c \cdot \left( n_t + \frac{\varphi}{2\pi} \right) \right] \cdot \omega$$

где  $\omega$  — угловая скорость вращения детали



$$r = r_0 + V_c \cdot n_t + K_{cn} \cdot \varphi = r_0 + V_c \cdot n_t + \frac{V_c}{2\pi} \cdot \varphi = r_0 + V_c \cdot \left( n_t + \frac{\varphi}{2\pi} \right)$$

Где:  $r_0$  — радиус отверстия в заготовке (в момент начального соприкосновения круга и шлифуемой детали);  $a$  — шаг спирали Архимеда, принятый равным величине расчетной подачи суппорта  $V_c$  шлифовального станка за один оборот детали,  $n_t$  — количество оборотов, сделанное деталью с момента начального соприкосновения круга и шлифуемой детали до момента измерения радиуса отверстия.

$$a_0(p) = a_D(p) + a_{ИК}(p) + a_{ВД}(p)$$

$$a_0(p) = \frac{1}{p} V_c(p) (1 - e^{-\rho\tau_D})$$

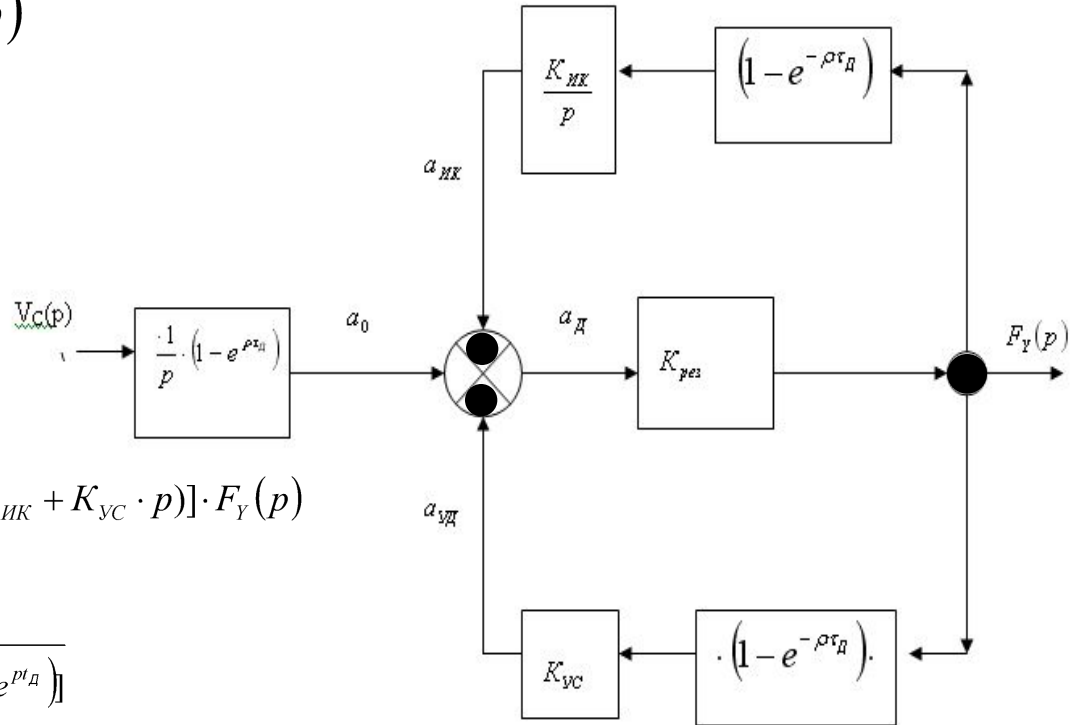
$$a_{ИК}(p) = \frac{1}{p} \cdot K_{ИК} (1 - e^{-\rho\tau_D}) \cdot F_Y(p)$$

$$a_{ВД}(p) = K_{VC} \cdot (1 - e^{-\rho\tau_D}) \cdot F_Y(p)$$

$$\frac{K_{рез}}{p} \cdot V_c(p) \cdot (1 - e^{-\rho\tau_D}) = [1 + \frac{K_{рез}}{p} \cdot (1 - e^{-\rho\tau_D})] \cdot (K_{ИК} + K_{VC} \cdot p) \cdot F_Y(p)$$

$$W(p) = \frac{F_Y(p)}{V_c(p)} = \frac{\frac{K_{рез}}{p} \cdot (1 - e^{-\rho\tau_D})}{1 + K_{рез} \cdot [K_{VC} \cdot (1 - e^{-\rho\tau_D}) + \frac{K_{ИК}}{p} \cdot (1 - e^{-\rho\tau_D})]}$$

$$W(p) = \frac{F_Y(p)}{V_c(p)} = \frac{\frac{K_{рез}}{p} \cdot (1 - e^{-\rho\tau_D})}{1 + \frac{K_{рез}}{p} \cdot (1 - e^{-\rho\tau_D}) \cdot (K_{VC} \cdot p + K_{ИК})}$$



Структурная схема

## Математическое преобразование формулы передаточной функции

$$W(p) = \frac{F_Y(p)}{V_c(p)} = \frac{\frac{K_{рез}}{p} \cdot (1 - e^{-p\tau_D})}{1 + \frac{K_{рез}}{p} \cdot (1 - e^{-p\tau_D}) \cdot (K_{yc} \cdot p + K_{ик})}$$

Разложим в ряд Пада выражение  $e^{-p\tau_D}$  с точностью до (2/2)

$$e^{-p\tau_D} = \frac{\tau_D^2 p^2 - 6\tau_D p + 12}{\tau_D^2 p^2 + 6\tau_D p + 12} \quad \text{Выполним преобразование } (1 - e^{-p\tau_D}) \text{ и получим:}$$

$$1 - e^{-p\tau_D} = 1 - \frac{\tau_D^2 p^2 - 6\tau_D p + 12}{\tau_D^2 p^2 + 6\tau_D p + 12} = \frac{\tau_D^2 p^2 + 6\tau_D p + 12 - \tau_D^2 p^2 + 6\tau_D p - 12}{\tau_D^2 p^2 + 6\tau_D p + 12} = \frac{12\tau_D p}{\tau_D^2 p^2 + 6\tau_D p + 12}$$

$$W(p) = \frac{\frac{K_{рез}}{p} \cdot \frac{12\tau_D \cdot p}{\tau_D^2 p^2 + 6\tau_D p + 12}}{1 + \frac{K_{рез}}{p} \cdot \frac{12\tau_D \cdot p}{\tau_D^2 p^2 + 6\tau_D p + 12} \cdot (K_{yc} \cdot p + K_{ик})} = \frac{\frac{12 \cdot K_{рез}}{\tau_D}}{p^2 + \left( \frac{6\tau_D + 12\tau_D \cdot K_{рез} \cdot K_{yc}}{\tau_D^2} \right) p + \left( \frac{12 + 12 \cdot \tau_D \cdot K_{рез} \cdot K_{ик}}{\tau_D^2} \right)}$$

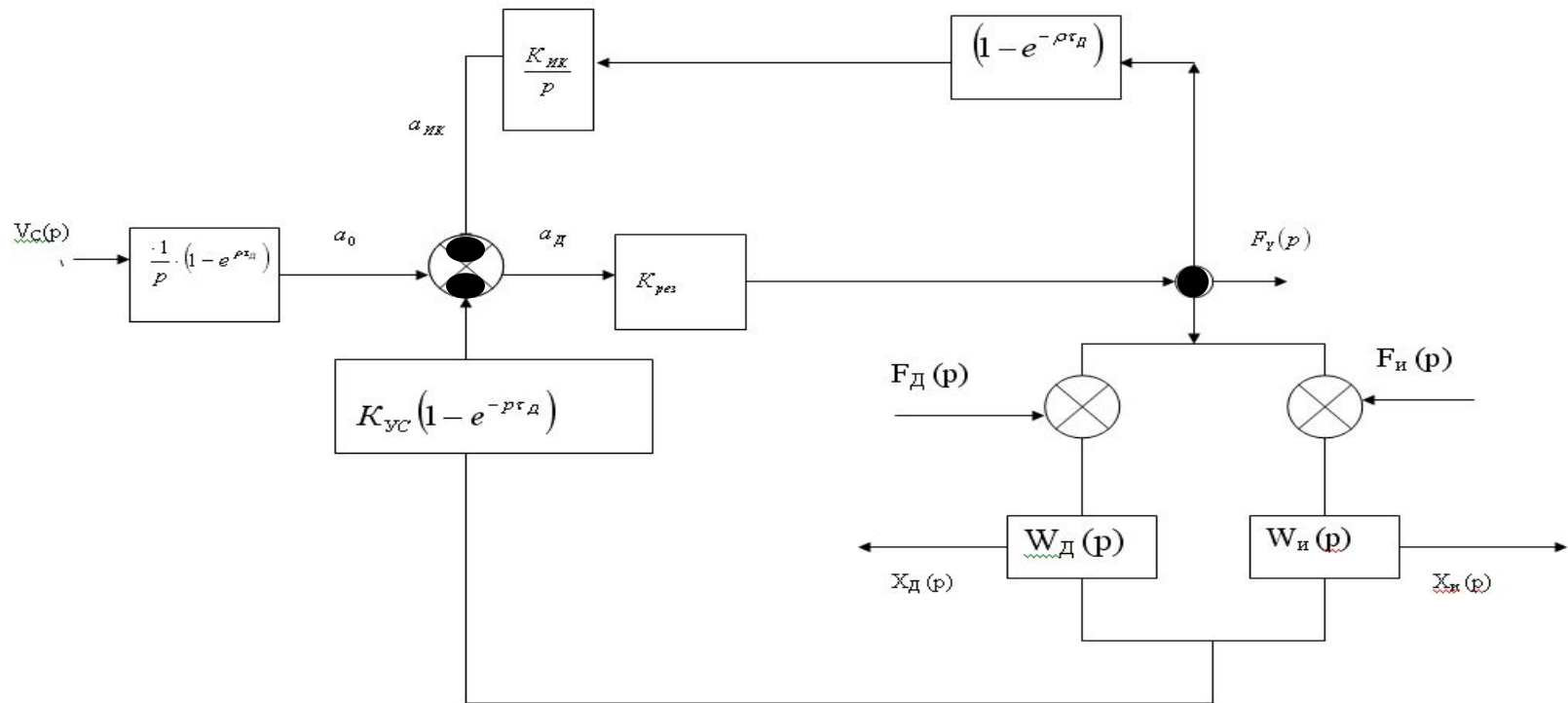
$$W(p) = \frac{K_C}{p^2 + T_1 p + T_2} \quad K_C = \frac{12 \cdot K_{рез} K_{резж}}{\tau_D} \quad T_1 = \frac{6\tau_D + 12\tau_D \cdot K_{резж} \cdot K_{рез} \cdot K_{yc}}{\tau_D^2} \quad T_2 = \frac{12 + 12 \cdot \tau_D \cdot K_{рез} \cdot K_{резж} \cdot a_2}{\tau_D^2}$$

При введении дополнительного звена запаздывания передаточная функция примет вид

$$W(p) = \frac{K_C \cdot (1 - e^{-p\tau_D})}{p^2 + T_1 p + T_2}$$

$$W(p) = \frac{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0} \quad \text{где } a_i - b_j \text{ постоянные коэффициенты.}$$





$W_{д}(p), W_{и}(p)$  – передаточные функции шпиндельных узлов детали и инструмента;

$F_{д}(p), F_{и}(p)$  – возмущающие воздействия;  $v_{п}$  – скорость подачи круга;

$a(p), a_{д}(p)$  – припуски заданный и снимаемый;  $K_{рез}, K_{рез}, K_{ус}$  – коэффициенты, определяющие процесс резания;

$\tau_{д}$  – время оборота детали;  $F_{р}(p)$  – сила резания;  $S_{д}, v_{д}$  – снимаемый припуск и скорость съема припуска;

$x_{д}(p), x_{и}(p)$  – приведенные к плоскости резания смещения шпиндельных узлов детали и инструмента

$$W_{дс}(p) = \frac{W_д(p) + W_и(p)}{1 + W_p(p)[W_д(p) + W_и(p)]}$$

$$W_{дс}(p) = \frac{h_д T_{и}^2 p^2 + 2h_д \gamma_{и} T_{и} p + h_д + h_и}{T_{и}^2 p^2 + 2\gamma T_{и} p + 1}$$

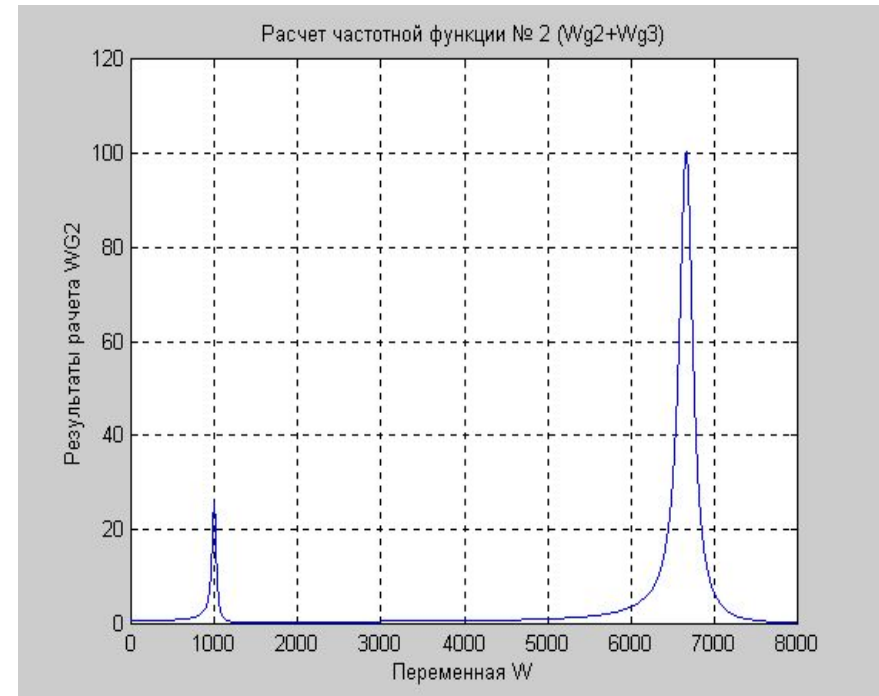
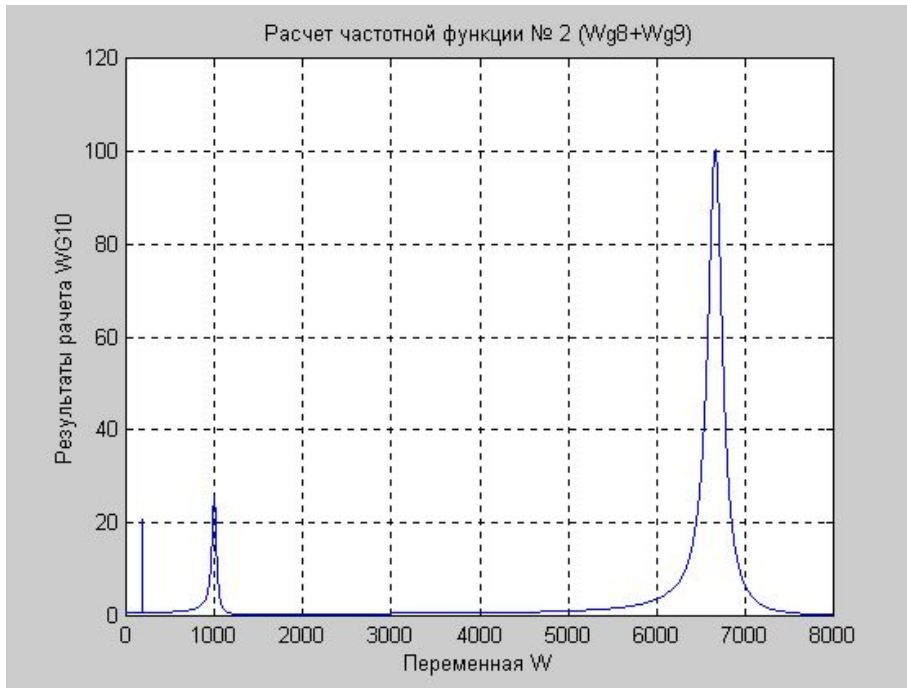
где  $\gamma = \gamma_{и} + 0,5K_{рез} \tau_д (h_д + h_{и}) T_{и}^{-1}$

$$|W(j\omega)|^2 = \frac{(h_д + h_{и} - h_д T_{и}^2 \omega^2)^2 + 4h_д^2 \gamma_{и}^2 T_{и}^2 \omega^2}{(1 - T_{и}^2 \omega^2)^2 + 4\gamma^2 T_{и}^2 \omega^2}$$

$$x_0(p) = \frac{[W_д(p) + W_и(p)]F_p(p)}{1 + W_p(p)[W_д(p) + W_и(p)]}$$

**Спектр выходного процесса ДС при учете по одной существенной частоте ШУ инструмента и ШУ детали и возмущения от дисбаланса круга (W – круговая частота)**

**Спектр выходного процесса ДС при учете по одной существенной частоте ШУ инструмента и ШУ детали (W-круговая частота)**



Для определения передаточной функции ДС  $W(p)$  предложен экспериментально-аналитический метод, сущность которого заключается, во-первых, в определении автокорреляционной функции (АКФ)  $K_y(\tau)$  виброакустических колебаний формообразующих узлов станка при обработке при условии, что ДС возбуждается силой резания, имеющей спектр типа «белый шум» во-вторых, в построении аналитической модели АКФ путем аппроксимации экспериментальных данных, в-третьих, в вычислении передаточной функции из формулы, полученной в работе.

$$W(p) \cdot W(-p)[X(p) + X(-p)] = K_y(p) + K_y(-p) \quad (1)$$

Для нашего случая, когда входной сигнал ДС есть «белый шум» со спектральной плотностью  $S_x(\omega) = S_0 = 1$ .

получено выражение для АКФ в виде

$$K_y(\tau) = \sum_{i=1}^n \frac{B(p_i)}{A'(p_i)} W(-p_i)[X(p_i) + X(-p_i)] e^{p_i|\tau|} + \sum_{i=n+1}^{n+r} W(p_i)W(-p_i) \frac{Q(p_i)}{R'(p_i)} e^{p_i|\tau|}$$

Это выражение определяет установившуюся АКФ выходной величины

$$K_y(\tau) = \sum_{i=1}^n \frac{B(p_i)B(-p_i)}{A'(p_i)A(-p_i)} e^{p_i|\tau|} \quad K_y(p) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{p - p_i} W(-p_i) \quad K_y(-p) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{-p - p_i} W(-p_i)$$

путем преобразований, получаем

$$K_y(p) + K_y(-p) = W(p_i)W(-p_i) \quad (2)$$

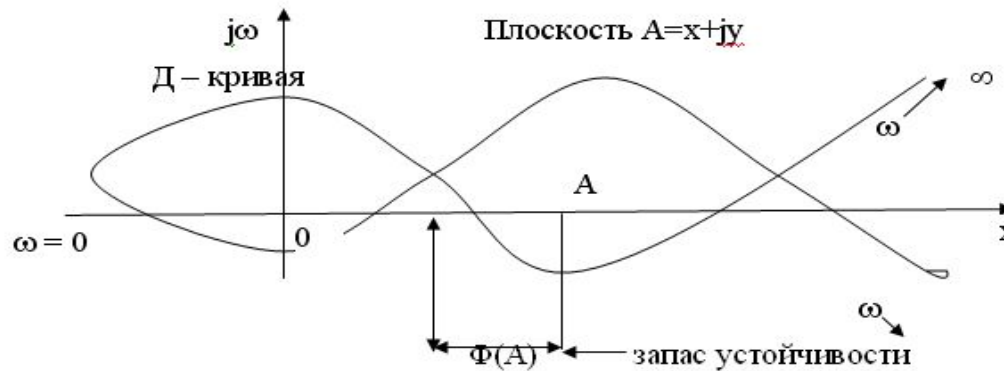
## Методы определения запаса устойчивости

Надежно функционирующая система должна держаться от границы устойчивости на определенном расстоянии,

т. е. обладать некоторым запасом устойчивости, необходимым для гарантированного обеспечения устойчивой

работы системы управления.

### Определение «запаса устойчивости» для токарного станка методом D - разбиения



Построение D – кривой и определение «запаса устойчивости» системы по одному из параметров: A – параметр, влияние которого на устойчивость определяется;  $\omega$  – частота

Степень близости замкнутой системы к границе устойчивости измеряется:

в критерии Рауса - Гурвица применительно к характеристическому полиному  $C_3(s)$  — отличием левых частей неравенств  $(\text{sgn}(c_n))^i M_i > \forall_i = 1, n$  от нуля;

в критерии Найквиста — минимальным расстоянием между контурным годографом  $W_k(j\omega)$  и точкой Найквиста  $(1, j0)$ .

**в критерии Михайлова** — минимальным расстоянием от годографа до начала координат  $(0, j0)$ ;

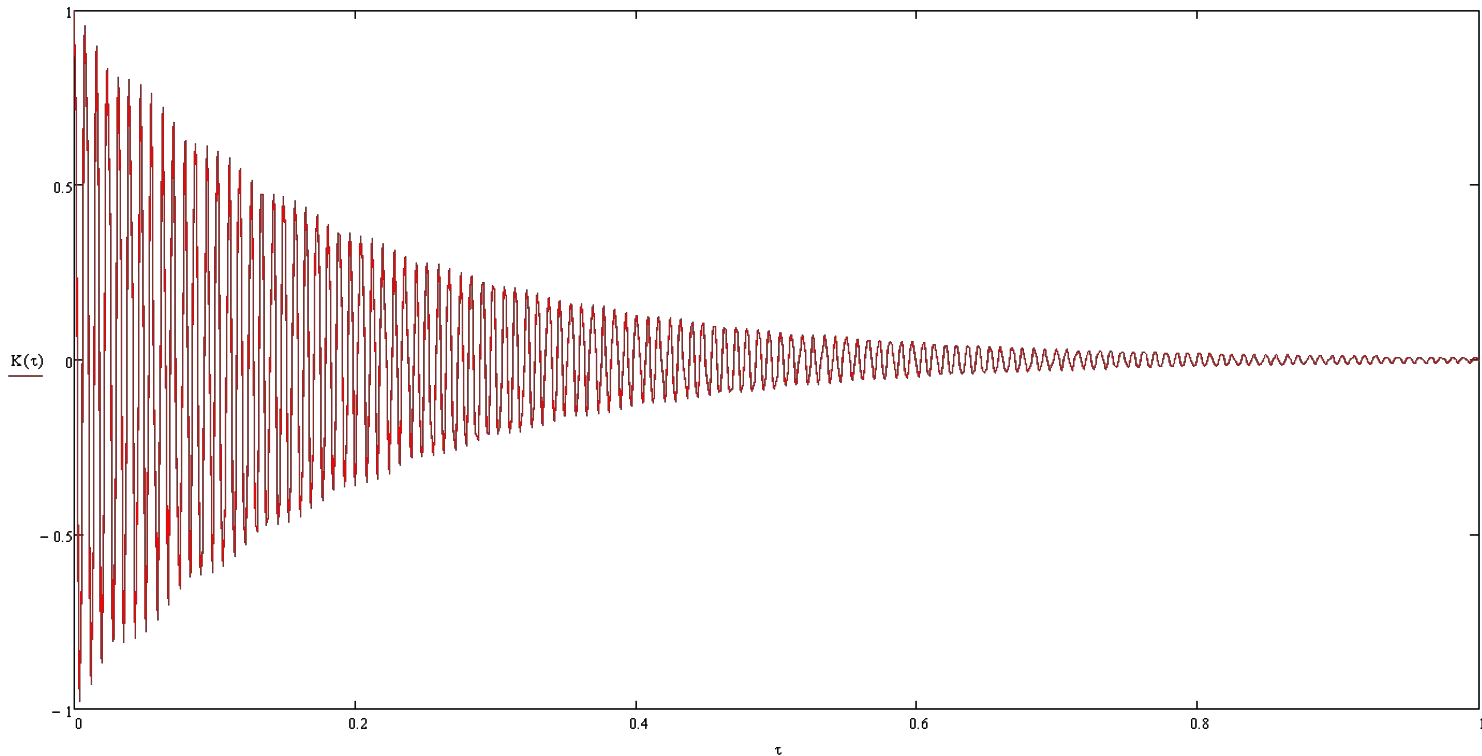
$$M(j\omega)$$

Для определения запаса устойчивости ДС станка при различных режимах обработки, например, подачу круга, используем критерий Михайлова, достаточно удобный для рассматриваемой замкнутой системы.

# Алгоритм идентификации ДС системы шлифовального станка при резании и выборе режима обработки по запасу устойчивости



# Идентификация передаточной функции по АКФ



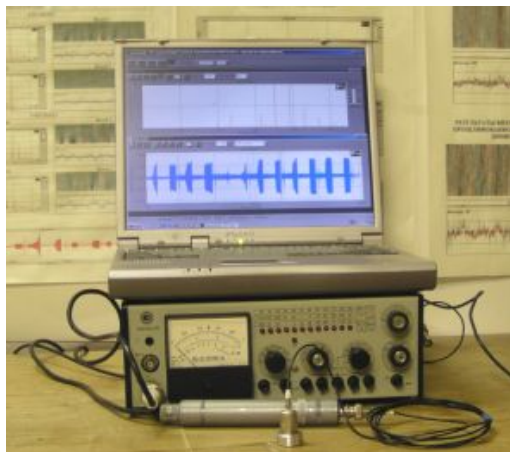
$$K(\tau) = D e^{-\alpha\tau} \cos \omega_0 \tau \quad (1)$$

причем  $K_{yy}(0) = D$ , где  $D$  – дисперсия ССП;  $\omega_1$  – круговая частота.

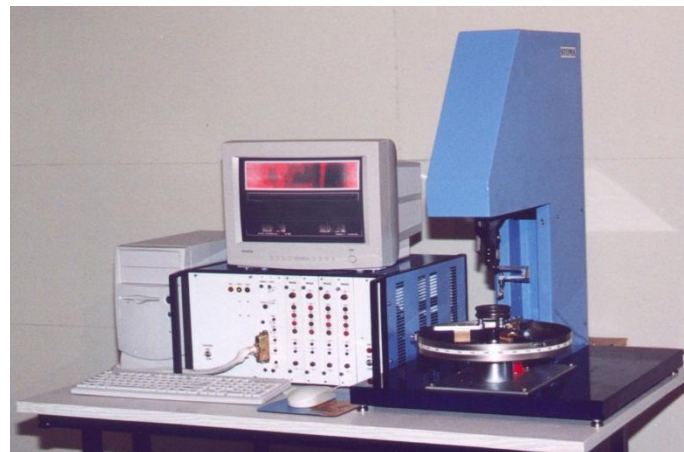
$$K_{yy}(p) = \frac{D (p + \alpha)}{(p + \alpha)^2 + \omega_1^2}$$

После проведения соответствующих алгебраических операций получим  $W(p) = \frac{k}{p^2 + \alpha p + \omega_0^2}$  (2)

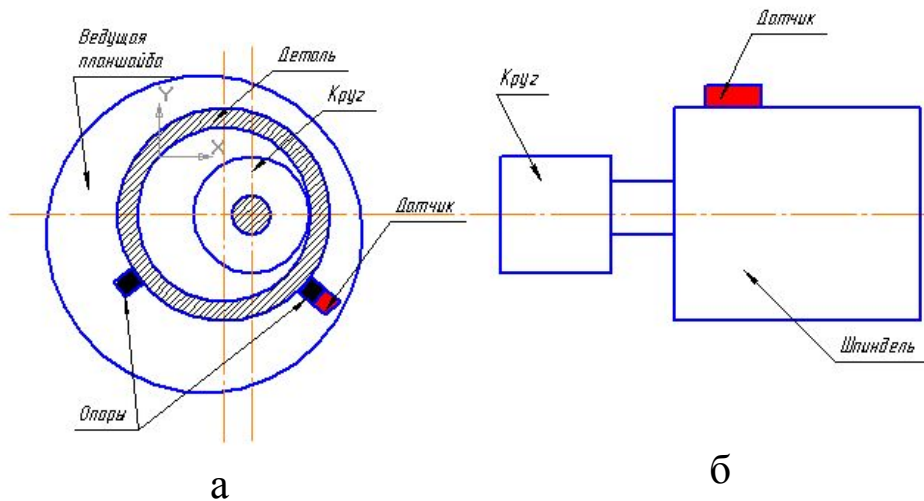
## Аппаратурное обеспечение измерений



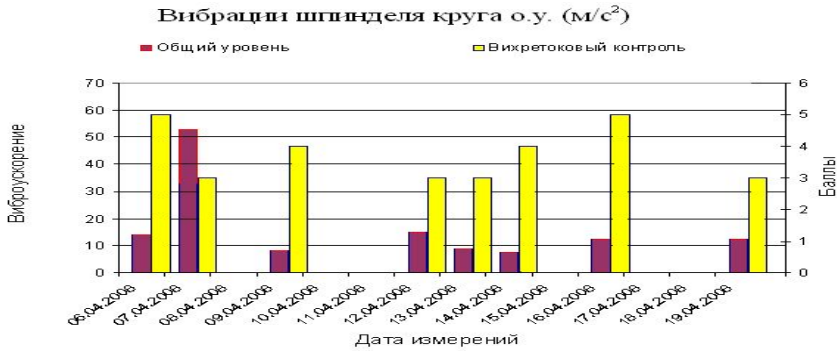
Виброизмерительная аппаратура



Автоматизированная система  
вихретокового контроля ПВК-К2М



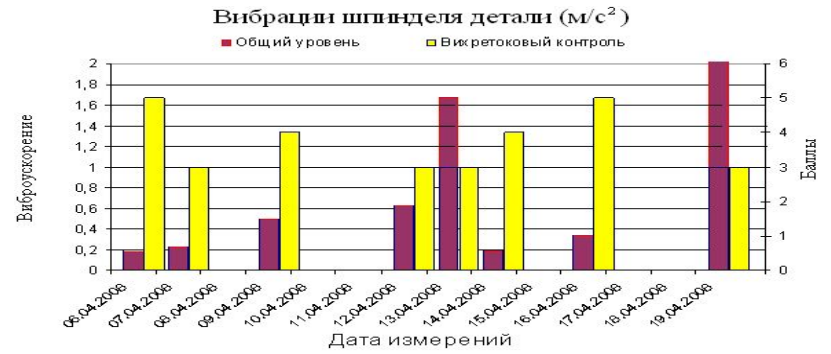
Размещение вибродатчиков на ШУ станка и узле крепления кольца:  
а - бабка изделия, б - шпиндель инструмента



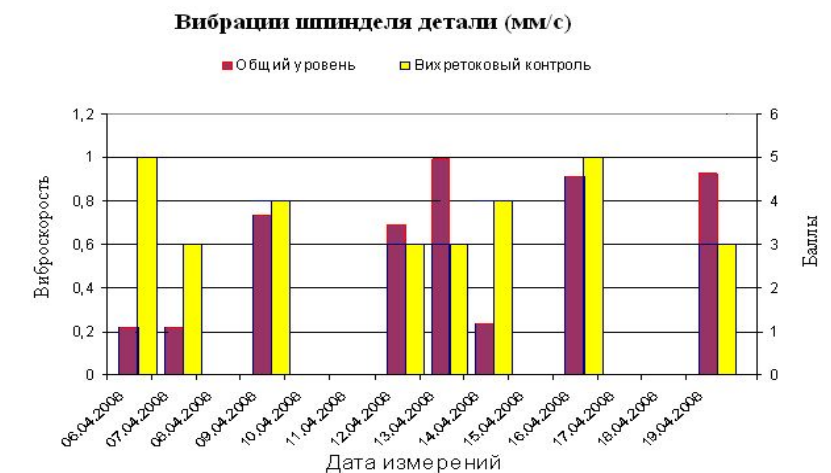
Сопоставительный анализ вибрации шпинделя круга с качеством поверхностей колец.



Сопоставительный анализ вибрации шпинделя круга с качеством поверхностей колец.



Сопоставительный анализ вибрации шпинделя детали с качеством поверхностей колец.



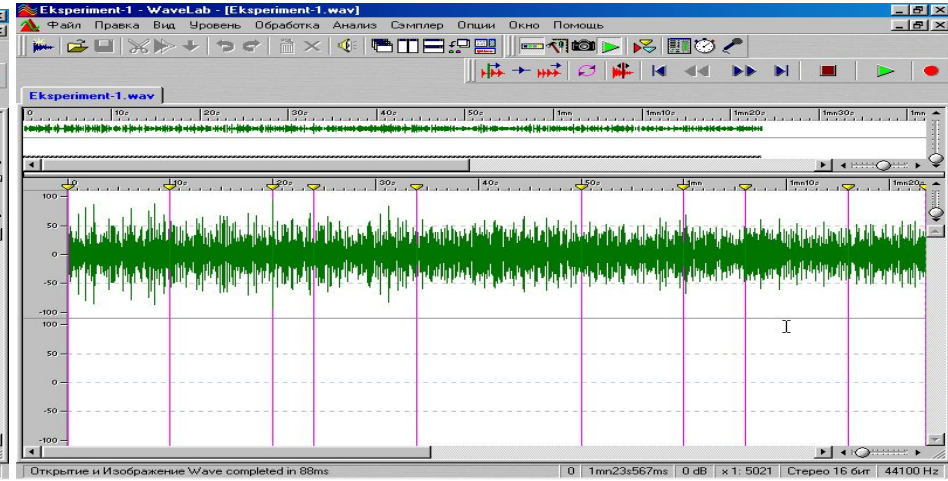
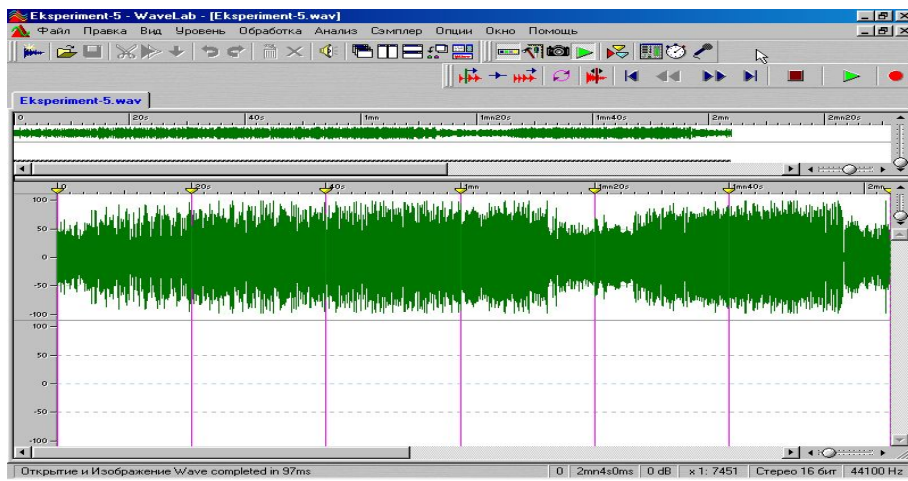
Сопоставительный анализ вибрации шпинделя детали с качеством поверхностей колец.

Тип кольца - 256907; Марка круга – 24A250M1K; СОТС – водный раствор триэтанолamina (1%) и нитрата натрия (1%); Материал детали ШХ-15; Подача круга -0,6мм/мин, 0,1мм/мин ;

Скорость вращения шпинделя круга – 4500-8000 об/мин; Скорость вращения шпинделя детали – 300 об/мин.

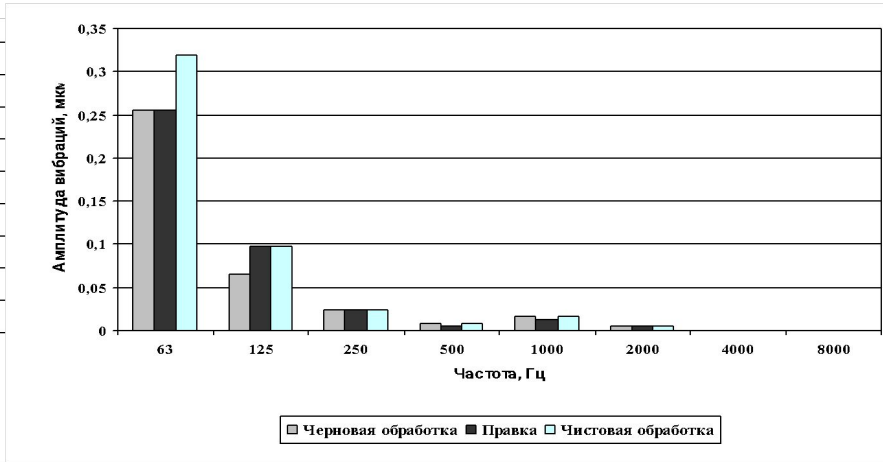
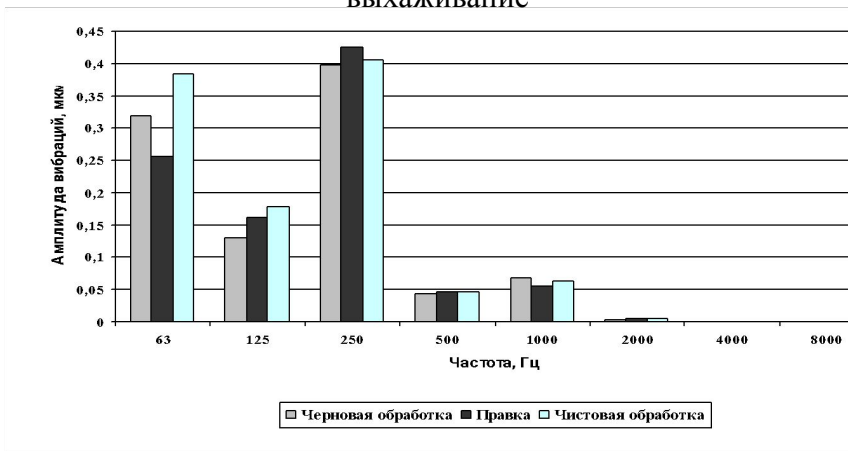
;





Запись вибраций шлифовального станка SIW-5 с четко выраженными переходами внутри цикла обработки детали: черновое шлифование – правка круга - чистовое шлифование - выхаживание

Запись вибраций шлифовального станка SIW-5 без ярко выраженных переходов внутри цикла обработки детали



Вибрации при шлифовании дорожек качения наружных колец подшипников 232726E2M/01 на станке SIW-5 № 332  
 Качество поверхности-4 балла, Волнистость-1,6 мк

Вибрации при шлифовании дорожек качения наружных колец подшипников 232726E2M/01 на станке SIW-5 № 331  
 Качество поверхности-5 баллов, Волнистость-1,1 мк

Тип кольца – 232736E2M/01; Марка круга – 25A10НСМ2 ; СОТС - водный раствор триэаноламина (1%) и нитрата натрия (1%); Материал детали ШХ-15; Подача круга – черновая 0,4-0,6 мм/мин, чистовая 0,2-0,4 мм/мин;

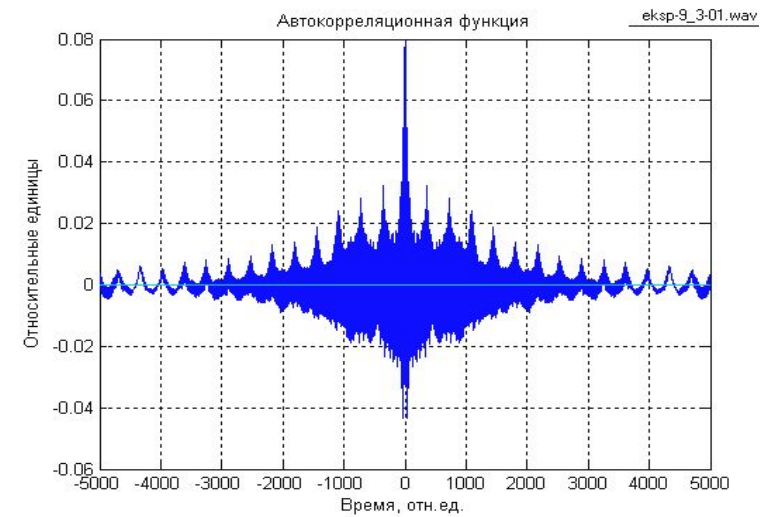
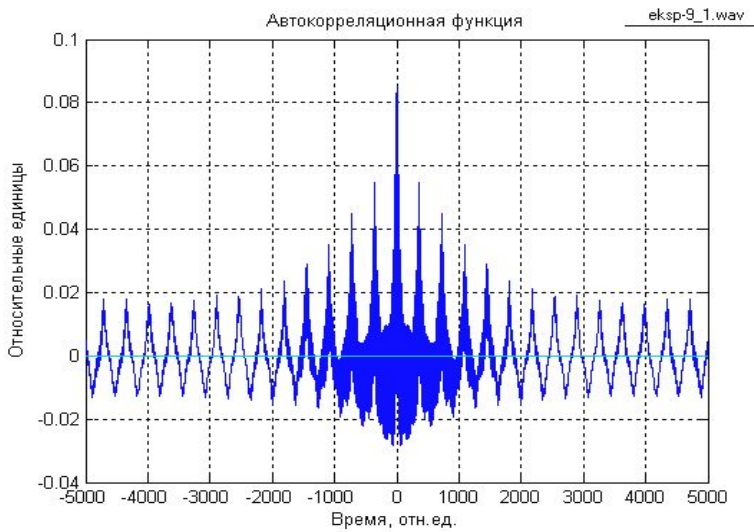
Скорость вращения шпинделя круга – 4500 – 8000 (об/мин); Скорость вращения шпинделя детали – 150 об/мин;

### Данные об исследованных станках SIW-5

Номер станка	Тип кольца	Вид обработки	Скорость вращения, об/мин	
			круга	детали
№ 331	232726/01	предварительная	4500	140
№ 332	232726/01	окончательная	4500	-
№ 322	32413/01	предварительная	8000	-
№ 302	12318/01	предварительная	8000	-
№ 333	12318/01	окончательная	8000	-
№ 395	2222/01	окончательная	8000	150

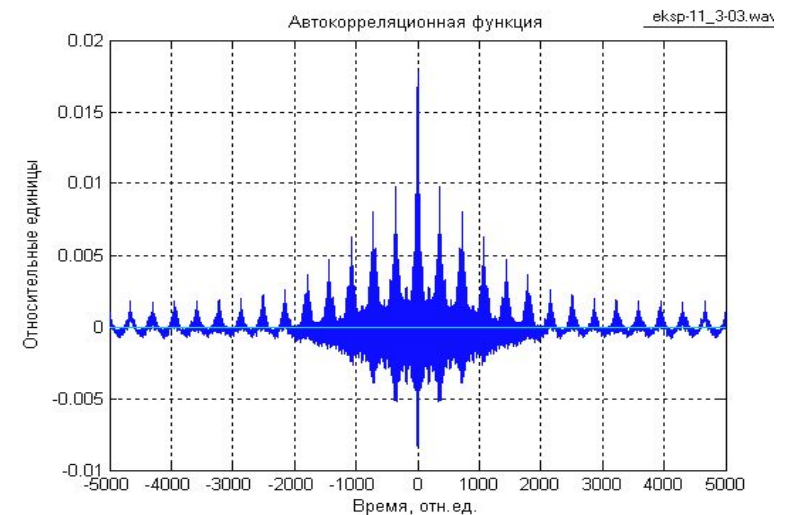
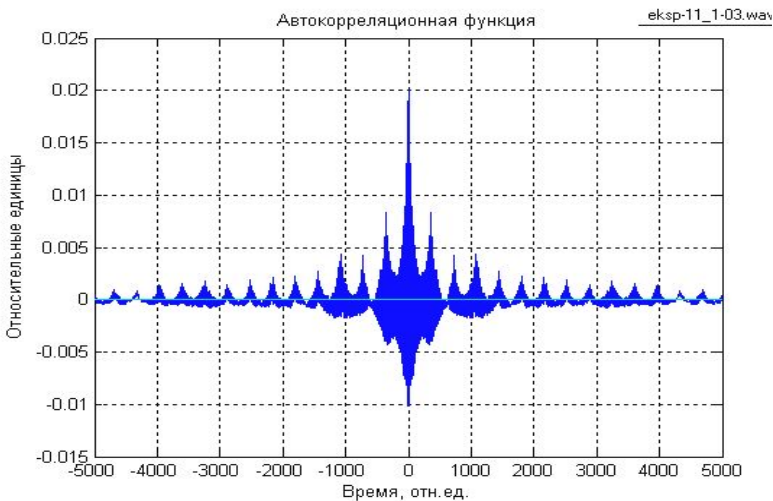
### Сравнительный анализ динамических характеристик станков SIW-5

Номер станка	Тип кольца	Вид обработки	ОУВ для ШУ круга (усл.ед.)	ОУВ для ШУ кольца (усл.ед.)
331	232726/01	предварительная	9000	
332	232726/01	окончательная	22000	
302	12318/01	предварительная	29000	1500
333	12318/01	окончательная	60000	2500
332	32413/01	предварительная	30000	2000
395	2222/01	окончательная	7500	180



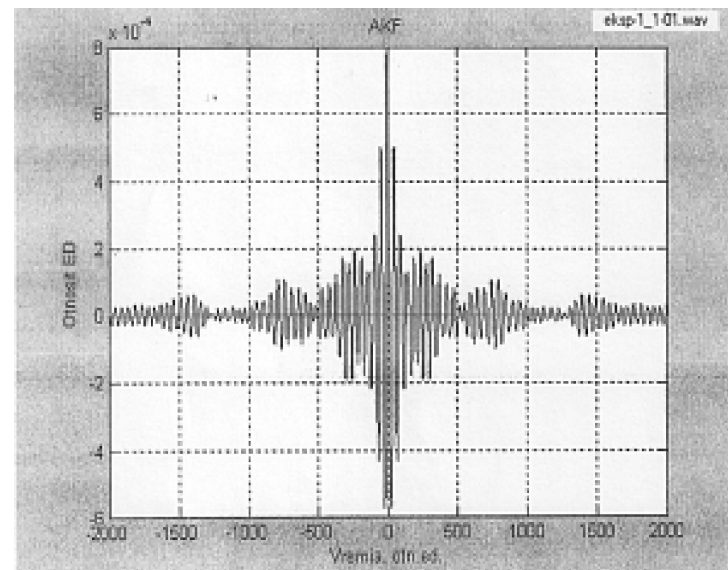
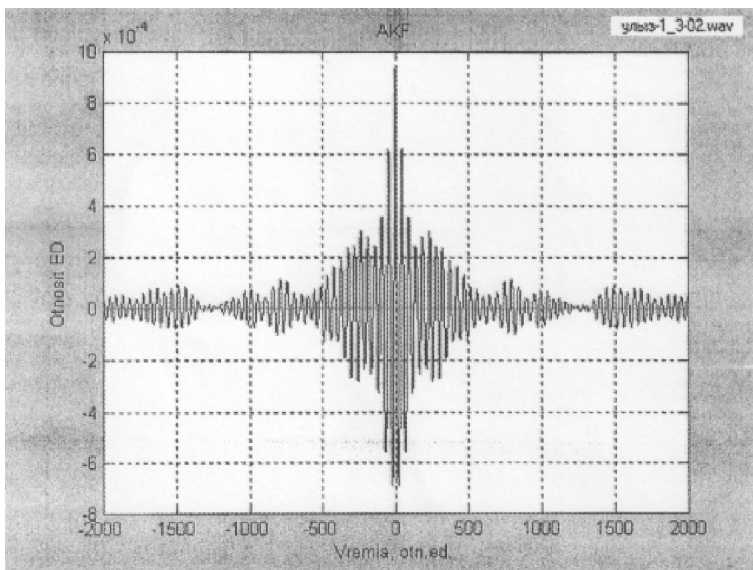
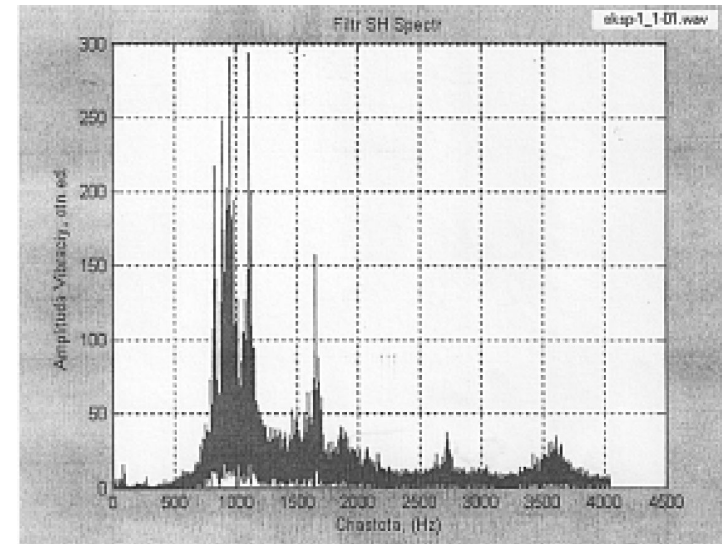
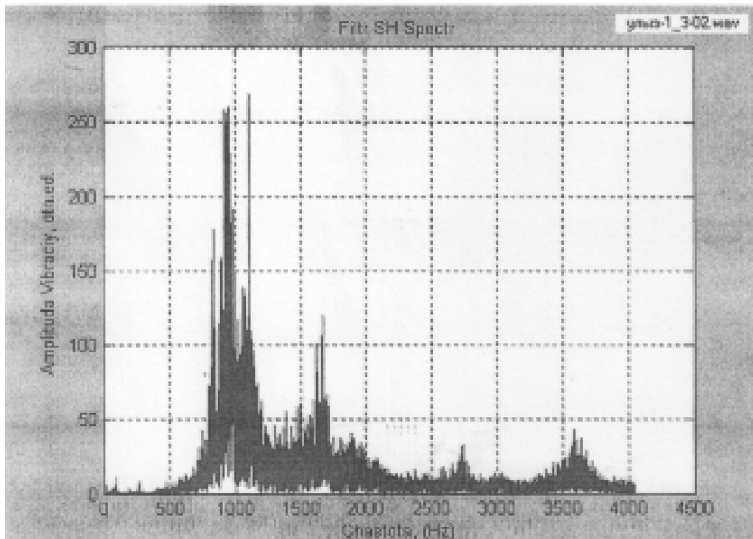
а – черновой проход; б – чистовой проход

## Автокорреляционные функции при обработке на шлифовальном станке SIW-5



а – черновой проход; б – чистовой проход

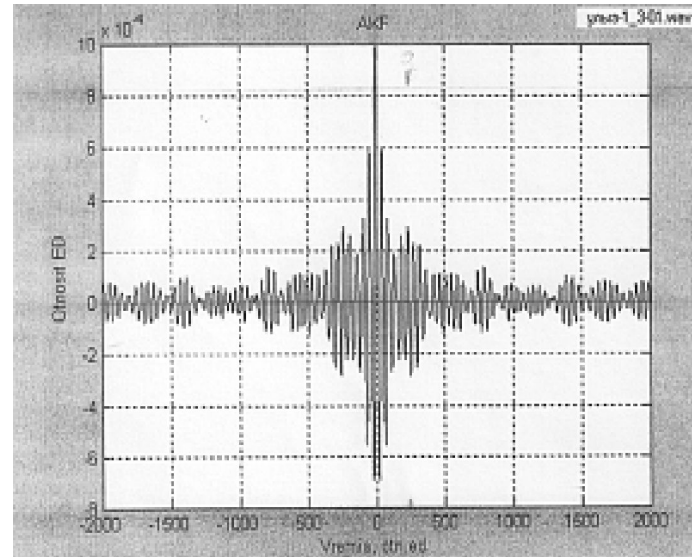
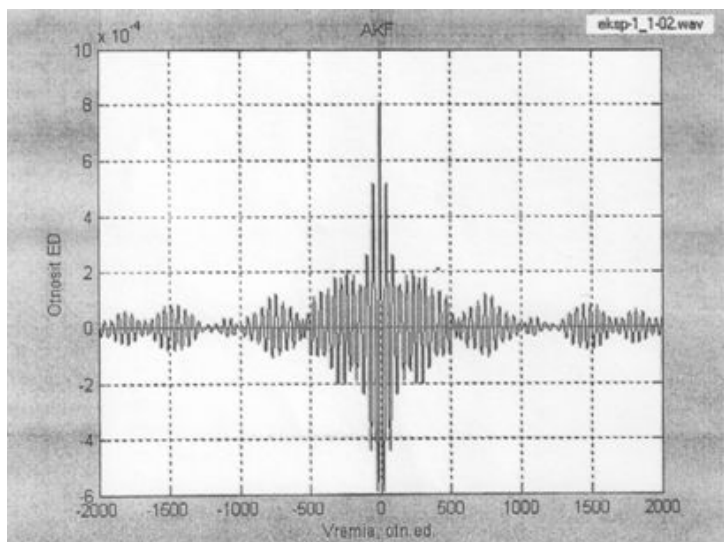
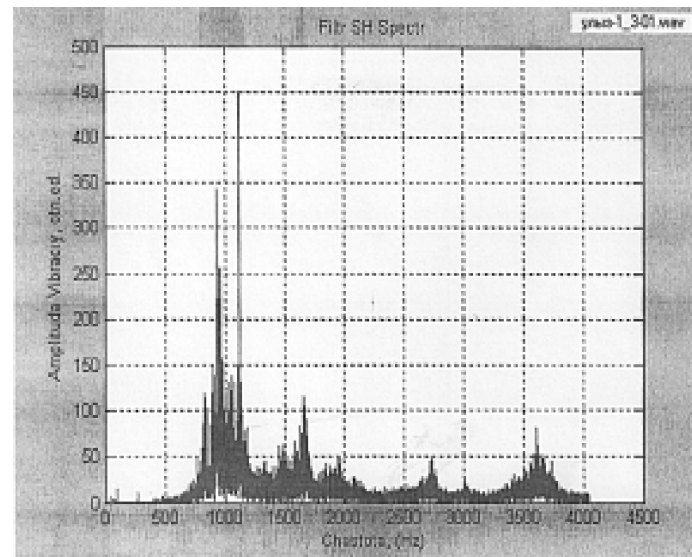
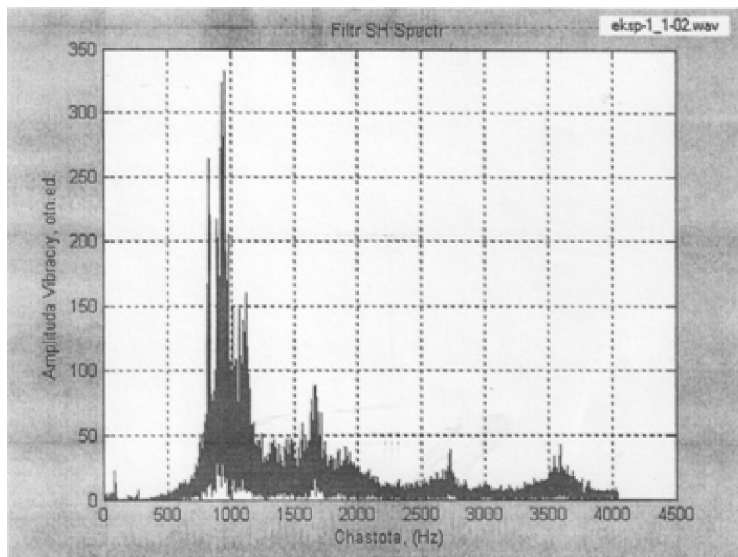
# Типичные виды спектра и автокорреляционной функции отфильтрованных виброакустических колебаний



Подача 0,3 мм/мин

Подача 0,4 мм/мин

# Типичные виды спектра и автокорреляционной функции отфильтрованных виброакустических колебаний



Подача 0,5 мм/мин

Подача 0,6 мм/мин

# Аппроксимация экспериментально полученной АКФ и вычисление передаточной функции

С достаточной для практики точностью автокорреляционная функция была аппроксимирована формулой

$$K(\tau) = A e^{-\alpha\tau} (1 + \cos \Omega\tau) \cos \omega_0\tau \quad (1)$$

где  $A = K(0)$ ,  $\alpha$  - коэффициент затухания экспоненты,  $\Omega$  - круговая частота низкочастотной составляющей АКФ (огibaющей),  $\omega_0$  -

$$K(\tau) = A \cdot \left[ e^{-\alpha\tau} \cos \omega_0 \cdot \tau + \frac{1}{2} e^{-\alpha\tau} \cdot \cos(\omega_0 + \Omega) \cdot \tau + \frac{1}{2} \cdot e^{-\alpha\tau} \cos(\omega_0 - \Omega)\tau \right]$$

$$K(p) = A \left[ \frac{p + \alpha}{(p + \alpha)^2 + \omega_0^2} + \frac{1}{2} \frac{p + \alpha}{(p + \alpha)^2 + (\omega_0 + \Omega)^2} + \frac{1}{2} \frac{p + \alpha}{(p + \alpha)^2 + (\omega_0 - \Omega)^2} \right]$$

$$K(p) = \frac{2(p + \alpha) [(p + \alpha)^2 + \omega_0^2]}{[(p + \alpha)^2 + (\omega_0 + \Omega)^2] [(p + \alpha)^2 + (\omega_0 - \Omega)^2]}$$

После алгебраических преобразований формулы с учетом

формулы  
получаем  
выражение

$$K(p) + K(-p) = W(p)W(-p)$$

для передаточной функции замкнутой ДС шлифовального станка

$$W_3(p) = A \frac{\sqrt{\alpha} \cdot (p + \omega_0) \cdot [(p + \alpha)^2 + \omega_0^2]}{[(p + \alpha)^2 + (\omega_0 + \Omega_0)^2] [(p + \alpha)^2 + (\omega_0 - \Omega_0)^2]} \quad (2)$$

Или в форме многочлена:

где  $a_i - b_j$  постоянные коэффициенты.

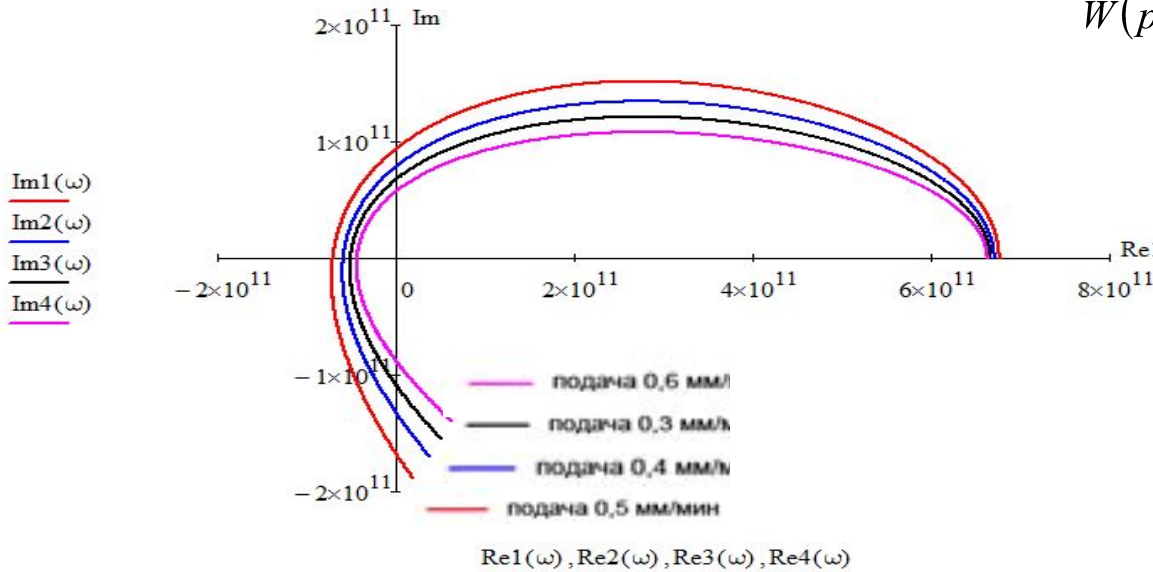
$$W(p) = \frac{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}$$

# Оценка запаса устойчивости по годографу Михайлова для различных подач на станке SIW-5

$$M(j\omega) = \left[ (j\omega + \alpha)^2 + (\omega_0 + \Omega)^2 \right] \cdot \left[ (j\omega + \alpha)^2 + (\omega_0 - \Omega)^2 \right]$$

Или в форме многочлена:

$$W(p) = \frac{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}$$



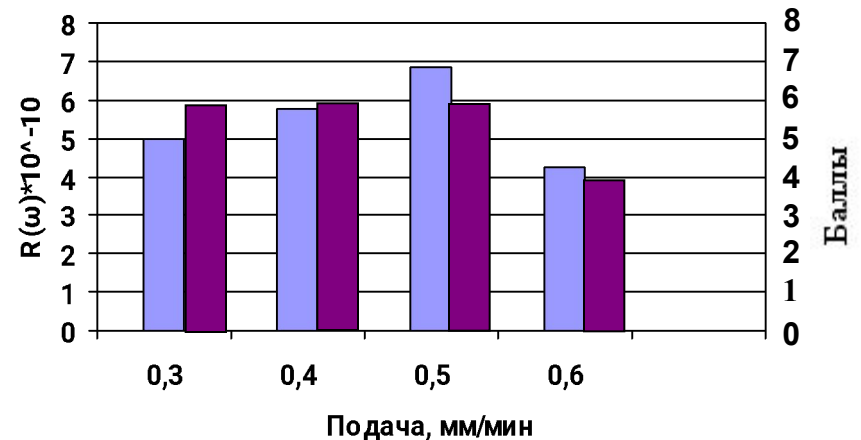
$$\omega_0 = 900 \text{ сек}^{-1}$$

$$\Omega = 67 \text{ сек}^{-1}$$

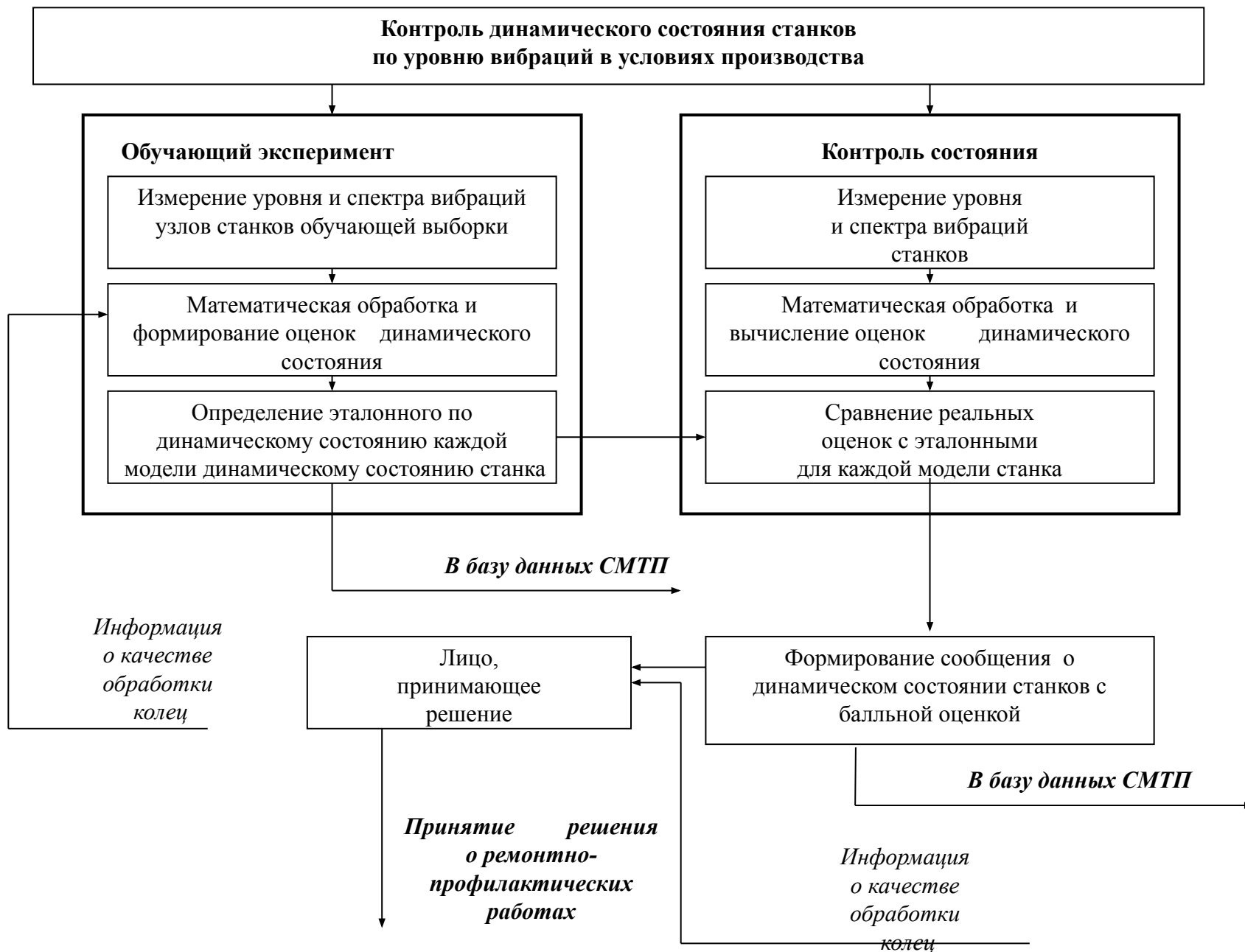
$$R(\omega) = \sqrt{X(\omega)^2 + Y(\omega)^2}$$

- Качество поверхности, в баллах

- Запас устойчивости, в усл. ед.

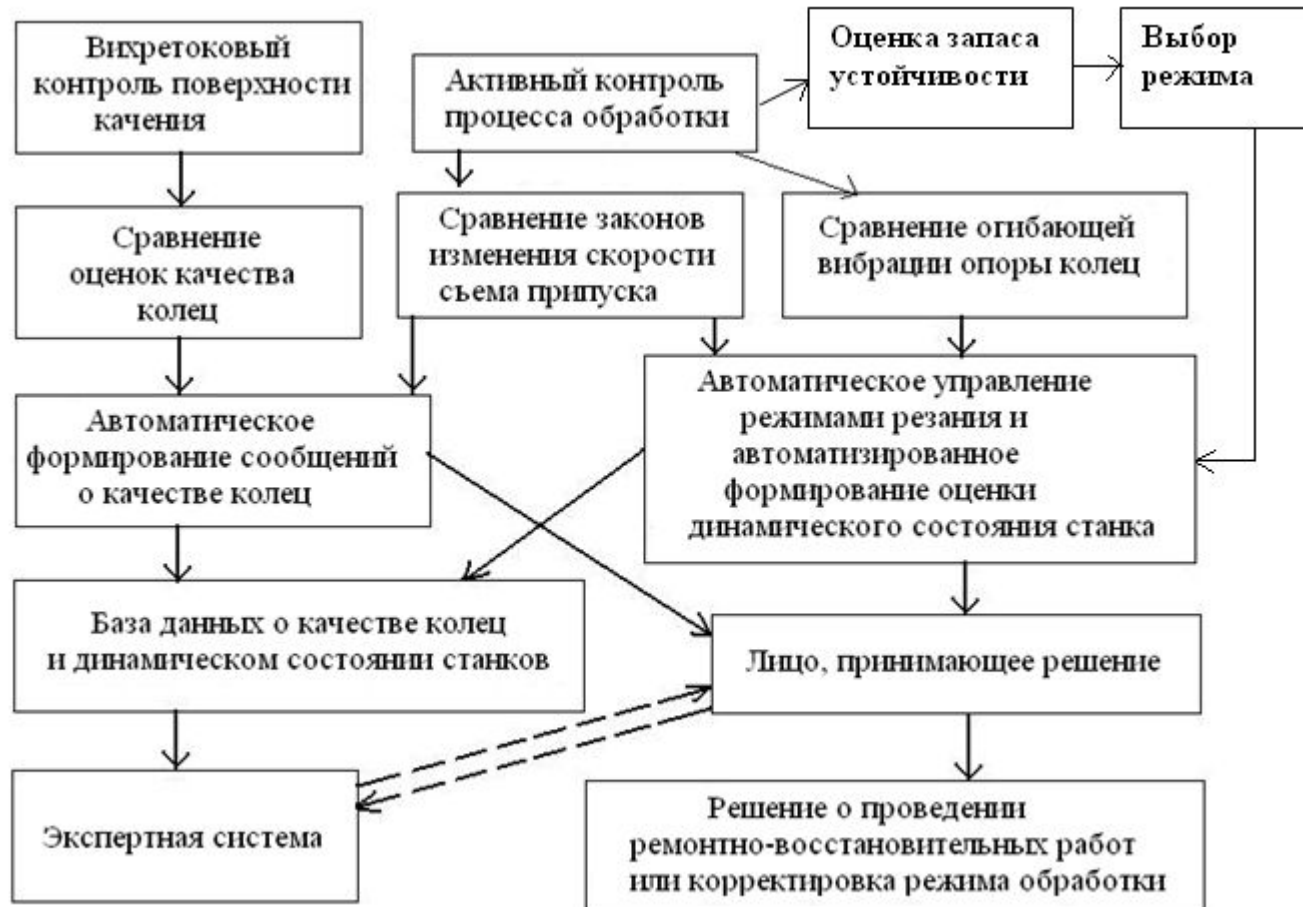


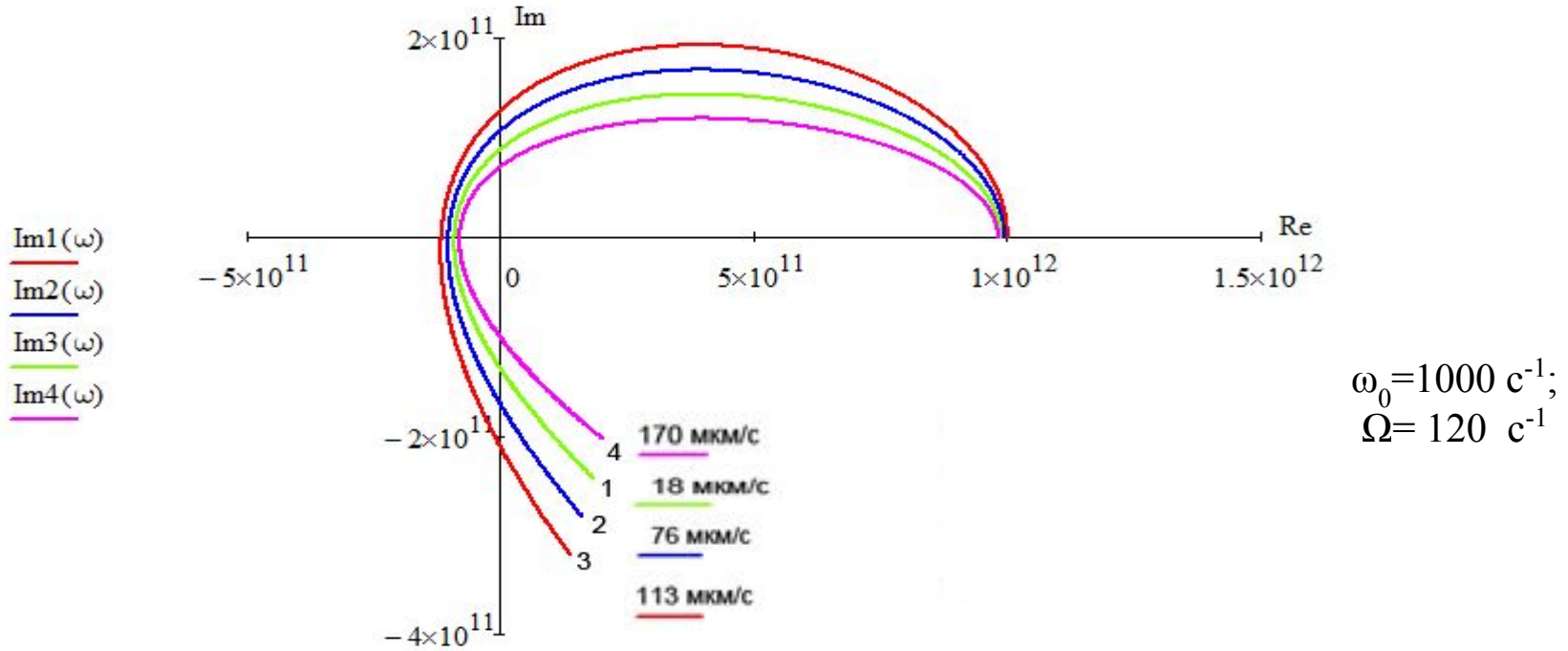
# Контроль динамического состояния станков как элемент системы мониторинга



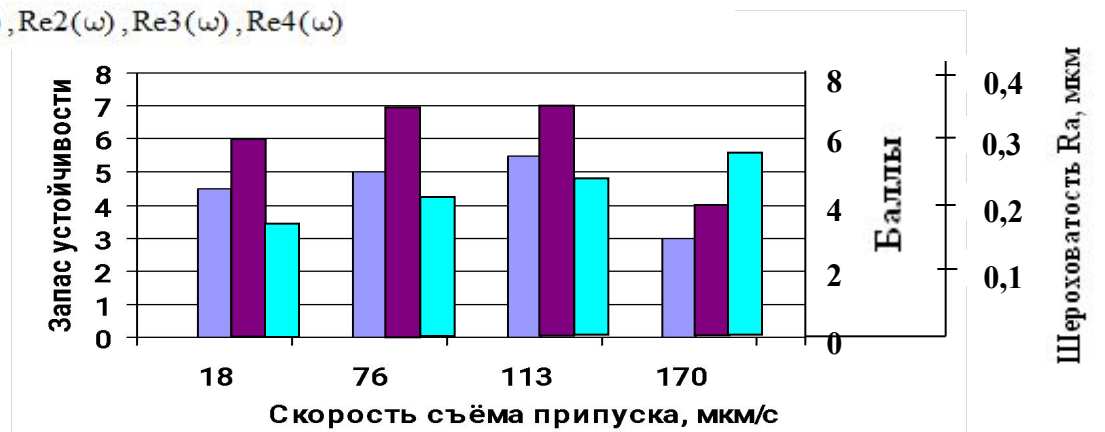


## Применение ВА контроля в системе мониторинга для определения рациональных режимов шлифования.

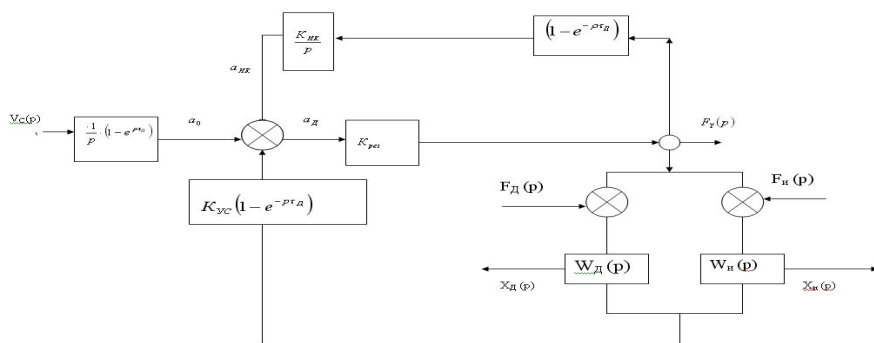




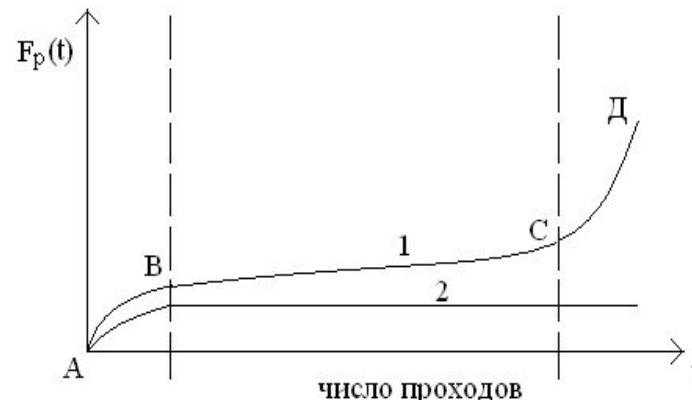
Re1( $\omega$ ), Re2( $\omega$ ), Re3( $\omega$ ), Re4( $\omega$ )



- Запас устойчивости, в усл. ед.
  - Оценка качества, в баллах
  - Шероховатость



**Обобщенная структурная схема процесса врезного внутреннего шлифования**



**Изменение величины силы резания в процессе шлифования**

$$W_p(p) = \frac{k_{\partial\partial\zeta} (1 - e^{-p\beta\tau_s})}{p \left[ 1 + k_{\partial\partial\zeta} (1 - e^{-p\tau_s}) \left( W_{\partial\partial} (p) + \frac{k_{\partial\partial}}{\delta^2} (1 - e^{-p\tau_s}) \right) \right]}$$

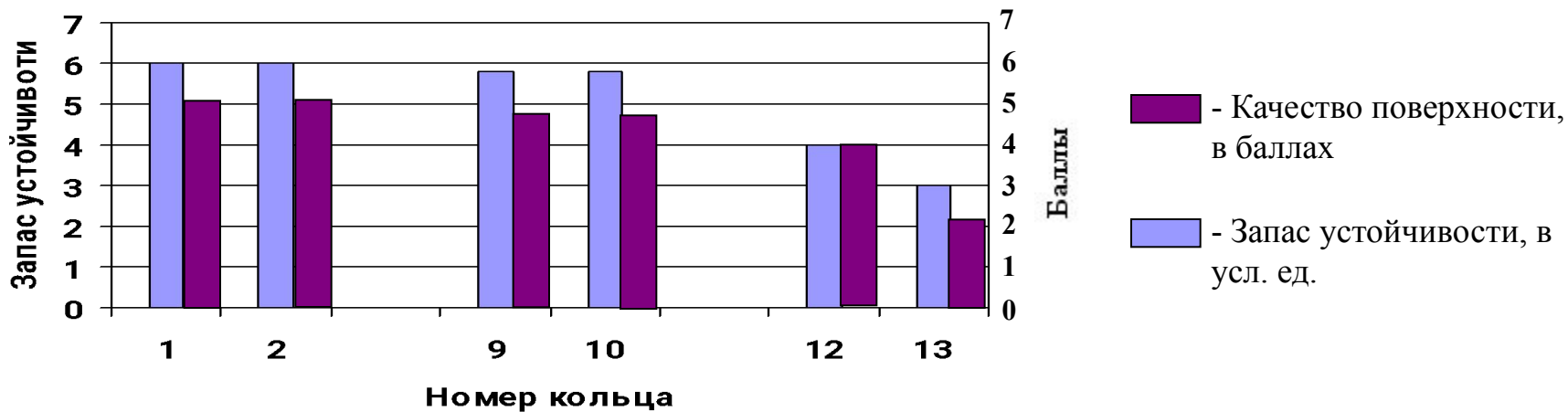
1 – с затуплением круга; 2 – с самозатачиванием круга.

$$W_{\partial} (p) = \frac{h_u}{T_u^2 p^2 + 2\gamma_u T_u p + 1}, \quad W_g (p) = h_g$$

$$W_{yc} (p) = W_u (p) + W_g (p)$$

$$W_p (p) = \frac{k_{\partial\partial\zeta}^* \tau_s}{T^2 p^2 + 2\gamma T p + 1}$$

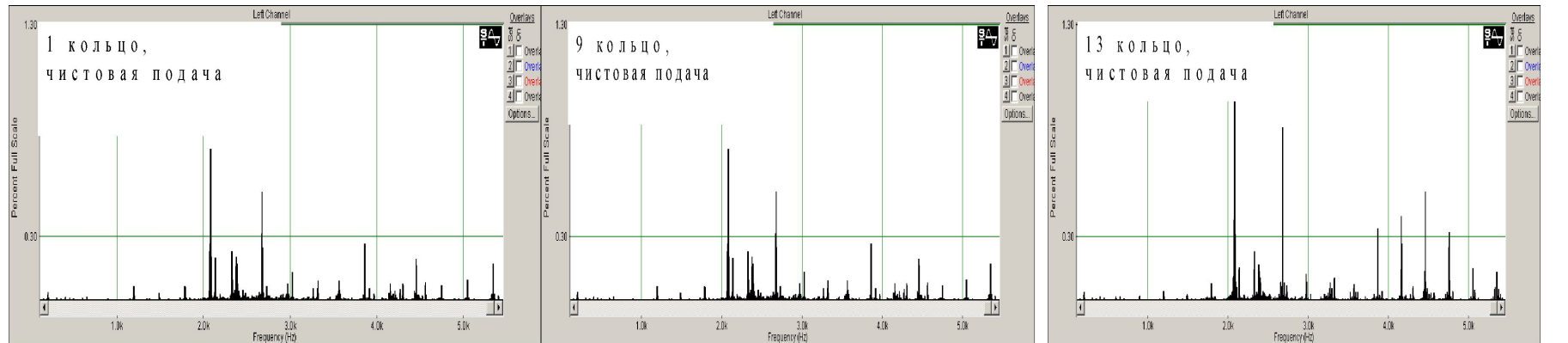
$$x_0 (p) = \frac{[W_{\partial} (p) + W_{\text{и}} (p)] F_p (p)}{1 + W_p (p) [W_{\partial} (p) + W_{\text{и}} (p)]}$$



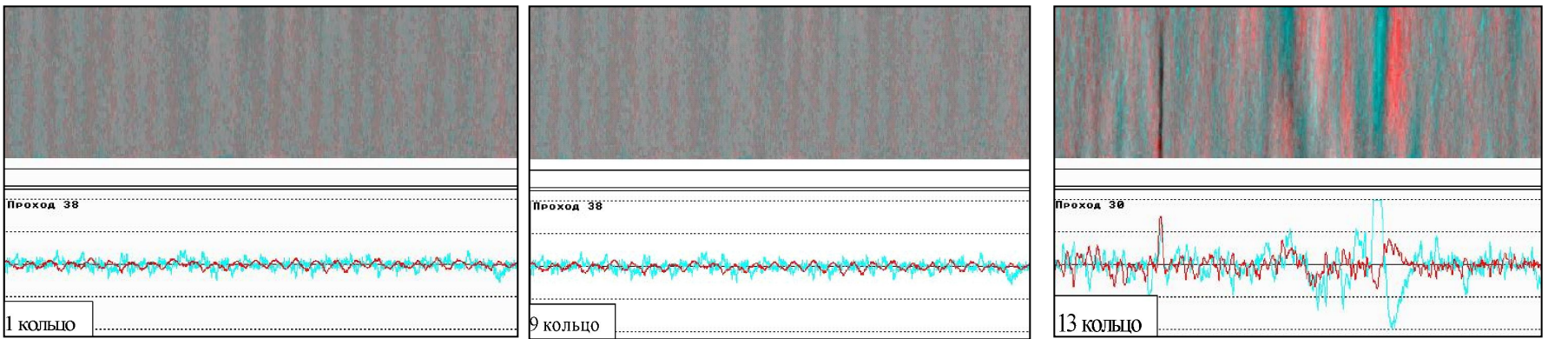
**Временная реализация вибрации (а), спектр вибрации (б), и результаты вихретокового контроля (в), при обработке первого, девятого и тринадцатого после правки круга кольца на станке SIW-3**



а)



б)



в)

1. Анализ научно-технической информации по вопросу обеспечения качества шлифовальной обработки колец подшипников показал недостаточную эффективность существующих методов управления технологическим процессом и позволил обосновать целесообразность контроля ВА характеристик станка для обоснования выбора режима шлифования, в частности подачи круга, что способствует повышению качества обработки и производительности технологического оборудования.
2. Разработан и обоснован метод идентификации замкнутой динамической системы шлифовального станка при обработке колец подшипников по автокорреляционной функции виброакустических колебаний формообразующей подсистемы при воздействии на сигнала типа «белый шум», что позволяет определить передаточную функцию системы при различных подачах круга.
3. Разработана технология построения модели динамической системы шлифовального станка в виде передаточной функции, связывающей силу резания с подачей круга, с использованием уточненной модели съема припуска по кривой, близкой к спирали Архимеда, на основе которой моделированием получены спектры регистрируемых колебательных процессов на выходе системы при воздействии на входе силы резания со стохастической составляющей типа «белый шум».
4. Разработана методика для определения рационального режима предварительного шлифования колец подшипников по максимальному запасу устойчивости динамической системы при изменении подачи круга, что позволяет получить заданную однородность физико–механических свойств поверхностного слоя дорожек качения колец подшипников, определяемую вихретоковым методом.
5. Результаты экспериментальных исследований, проведенных на шлифовальных станках SIW-3, SIW-4 и SIW-5 в условиях эксплуатации, установили связь между запасом устойчивости и качеством обработки поверхностного слоя (в баллах), определяемых при различных подачах, что позволило определить рациональную подачу, при которой ДС имеет наибольший запас устойчивости, заданное качество и наибольшую производительность.

6 Практическая реализация метода идентификации ДС в производственных условиях позволила обосновать, во-первых, допустимую скорость съема припуска при шлифовании колец, обеспечивающую заданные качества поверхностного слоя, во-вторых, увеличить вдвое период правки. Полученные результаты позволяют определить максимальное значение подачи круга для каждого станка и внести эти значения в систему мониторинга, а также повысить стабильность параметров качества поверхностного слоя колец на 15-20%, сократить брак и предотвратить образование прижогов в поверхностном слое.