

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.923.

А. А. Игнатьев, В. А. Каракозова, А. И. Зорин

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ КАЧЕНИЯ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ НА ФИНИШНЫХ ОПЕРАЦИЯХ

Аннотация.

Актуальность и цели. Динамические характеристики станков, оцениваемые по виброакустическим колебаниям основных узлов, оказывают существенное влияние на качество обработки высокоточных деталей для машино- и приборостроения. На основе установления связи виброакустических колебаний с точностью и физико-механическими характеристиками дорожек качения колец подшипников при шлифовании определяется целесообразность значения параметров режимов обработки. Цель данной работы – повышение качества обработки деталей подшипников на основе оперативной идентификации динамического состояния шлифовального станка по стохастическим характеристикам виброакустических колебаний основных узлов формообразующей подсистемы.

Материалы и методы. Приведены результаты применения к станкам оригинального метода экспериментально-аналитического определения передаточной функции динамической системы через полученную в результате обработки записи виброакустических колебаний автокорреляционную функцию. Для решения поставленной задачи рассматривается возможность определения рационального режима шлифования поверхностей качения колец подшипников на основе измерения виброакустических колебаний динамической системы при воздействии на нее сигнала типа «белый шум». Вычисление передаточной функции замкнутой динамической системы осуществляется при различных подачах круга. Установлена связь запаса устойчивости динамической системы, вычисляемой из передаточной функции для каждого значения подачи шлифовального круга с неоднородностью структуры поверхностного слоя дорожек качения, которое оценивается вихретоковым методом.

Результаты. Результаты экспериментальных исследований, проведенных на шлифовальных станках 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 динамическая система имеет наибольший запас устойчивости, обеспечивается заданное качество обработки дорожек качения колец подшипников и наибольшая производительность.

Выводы. Рассмотренная методика определения целесообразного режима обработки на основе идентификации динамической системы станка при резании, базирующаяся на методах теории автоматического управления в применении к шлифовальным станкам, может быть применима для других видов механической обработки.

Ключевые слова: шлифование, подача круга, передаточная функция, автокорреляционная функция, динамические характеристики, модель динамической системы, съем припуска, виброакустические колебания, запас устойчивости.

A. A. Ignat'ev, V. A. Karakozova, A. I. Zorin

MODELLING AND IDENTIFICATION OF GRINDING MACHINE DYNAMIC SYSTEM DEFINING QUALITY OF RACERS' ROLLING SURFACE IN FINISHING OPERATIONS

Abstract.

Background. The dynamic characteristics of machines estimated by vibroacoustic (VA) oscillations of the basic units have essential impact on processing quality of high-precision details for machine and instrument making. On the basis of establishment of connection of VA oscillations with precision and physical-mechanical properties of racers' rolling path during grinding the authors determine expediency of processing modes' parameter values. The purpose of this work is to improve quality of bearing details processing on the basis of expeditious identification of a dynamic condition of a grinder according to stochastic characteristics of vibroacoustic oscillations of the main units of a form-building subsystem.

Materials and methods. The article adduces the results of machine tool application of the original method of experimental and analytical definition of the transfer function of the dynamic system (DS) through the autocorrelation function (ACF), received as a result of processing of VA oscillations record. To solve the present considered the authors considered a possibility of defining a rational mode of racers' rolling surface grinding by measuring VA oscillations dynamic system under the effect of the signal such as "white noise". Calculation of the transfer function of the closed dynamic system was carried out for various wheel infeeds. Connection between the DS stability margin, calculated from the transfer function for each value of a grinding wheel infeed, with heterogeneity of the structure of the surface layer of the rolling paths, which is estimated by the eddy current method.

Results. Results of experimental studies, conducted on grinding machines SIW-5 in service, established a link between the stability margin and processing quality of the surface layer (in points) determined at different infeeds, that allowed to determine the rational flow, in which the DS has the largest margin of stability and the quality of racers' rolling paths and the highest performance are provided.

Conclusions. The considered technique of defining an expedient mode of processing on the basis of identification of DS of the machine at the cutting, based on the methods of the theory of automatic control in application to grinders, can be applicable for other types of machining.

Key words: grinding, supply range, transfer function, autocorrelation function, dynamic characteristics, dynamic system model, stock removal, vibroacoustic oscillations, stability margin.

Одним из наиболее важных факторов, от которого зависит качество шлифования, является динамическое состояние станка, определяемое характером колебательных процессов в узлах формообразующей подсистемы. Уровень и частотный состав виброакустических (ВА) колебаний как без резания, так и при резании являются важными, а иногда и единственными критериями нормального функционирования станка, поскольку служат обобщаю-

щими показателями его динамических характеристик, существенно влияющих на формирование некруглости и волнистости колец и связанную с ними неоднородность физико-механических свойств поверхностей качения. Оценка влияния динамических процессов при шлифовании выполнена во многих работах, в частности [1–3].

Для оценки динамических характеристик станка возникает необходимость в построении достоверной математической модели объекта. Шлифовальный станок является сложной динамической системой (ДС), состоящей из нескольких подсистем, взаимодействие между которыми осуществляется в различной степени как при резании, так и без резания (на холостом ходу).

Модель ДС необходима при анализе виброустойчивости, а также при синтезе системы управления станком. Процесс шлифования является довольно сложным объектом управления (ОУ), так как при обработке деталей взаимодействуют силовые и тепловые процессы, связанные с резанием и пластическими деформациями металла, процессы износа шлифовального круга и изменения его режущих свойств, динамические процессы в формообразующей подсистеме, включая колебательные процессы в шпиндельном узле (ШУ) шлифовального круга и детали, процессы трения, процессы в электро- и гидроприводах рабочих движений станка, гидродинамические процессы в зоне шлифования, а также некоторые другие процессы, влияние которых несущественно или их учет весьма затруднителен [2].

Для обеспечения качества колец при обработке на современных шлифовальных автоматах необходимо учитывать, как достаточно известные методы технологии машиностроения, так и методы теории управления. Последние позволяют не только эффективно выполнить анализ влияния динамических характеристик станков на результаты обработки, но и учесть воздействие как детерминированных, так и стохастических составляющих процессов в (технологической системе) ТС, а также реализовать управление качеством на основе нескольких информационных параметров, в том числе и по принципу обратной связи с применением приборов активного контроля [2, 3]. Поэтому очень важно реализовать в производстве методики управления шлифованием на основе оценки динамического состояния станка по стохастическим характеристикам и контролю качества обработки колец.

Разработка системы автоматического управления (САУ) процессами шлифования связана с наличием достоверной математической модели процесса как объекта управления, который можно описать дифференциальными или операторными уравнениями, передаточными, переходными или частотными функциями [4]. На практике можно построить как теоретическую модель динамической системы, так и экспериментально-аналитическую модель, применяя методы теории идентификации [5].

В данной статье решена задача построения модели ДС в виде передаточной функции, характерным отличием которой является разработка уточненной модели съема припуска.

Построению модели ДС предшествует составление функциональной схемы [6].

Для установившегося процесса шлифования сила резания представляется формулой

$$F = f_1(k_{\text{реж}}, q, v_k, b, h), \quad (1)$$

где $k_{\text{реж}}$ – коэффициент, характеризующий режущую способность круга; q – коэффициент, характеризующий физико-механические свойства обрабатываемого материала; v_k – скорость резания; b – ширина шлифования, равная при врезном шлифовании ширине обрабатываемой детали; h – глубина резания.

Кроме того, на динамику процесса резания при врезном шлифовании будут оказывать влияние площадь S контактирующей (активной) режущей поверхности круга и детали (рис. 1), которая определяется размерами ширины шлифования b и длиной дуги активного контакта l :

$$S = b \cdot l. \quad (2)$$

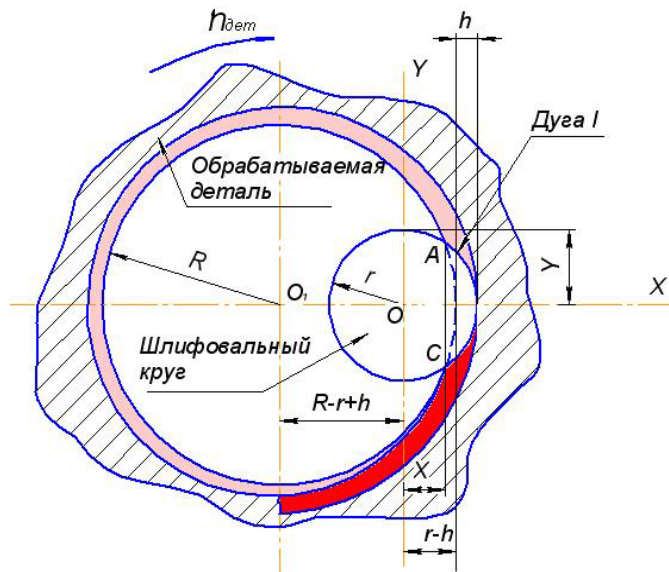


Рис. 1. Схема контакта круга и детали при врезном шлифовании: R – радиус шлифуемого отверстия; r – радиус шлифовального круга; X, Y – текущие координаты; l – длина дуги активного контакта круга и детали; h – глубина врезания круга в деталь за один оборот детали; A, C – точки пересечения окружностей абразивного круга и отверстия в детали

От колебаний величины S зависят колебания усилия резания F , которые оказывают влияние на температуру в зоне резания и скорость съема припуска.

При постоянном значении b площадь S контактирующей (активной) режущей поверхности круга зависит от длины дуги контакта l . Применяемые в шлифовании формулы для определения длины дуги контакта в основном эмпирического происхождения, не связывающие размеры круга и отверстия детали, что снижает точность вычислений по этим формулам, например [7]:

$$l = C_1 \cdot t_{\phi}^{0,5}, \quad (3)$$

где t_{ϕ} – фактическая глубина шлифования.

Для выведения более точной формулы длины дуги контакта l рассмотрим схему контакта круга и детали при врезном шлифовании, приведенную на рис. 1.

Найдем точки пересечения окружностей абразивного круга и отверстия в детали (A, C) (см. рис. 1), для чего решим систему двух уравнений:

$$\begin{cases} [X + (R - r + h)]^2 + Y^2 = R^2, \\ X^2 + Y^2 = r^2, \end{cases} \quad (4)$$

где X, Y – текущие координаты; R – радиус отверстия; r – радиус шлифовального круга.

Из совместного решения уравнений (4) следует

$$X_A = \frac{C_1 \cdot (r - h)}{C_1 + h}, \quad (5)$$

$$Y_A = \sqrt{\frac{2hrR}{C_1 + 2h}}, \quad (6)$$

где X_A и Y_A – координаты точки пересечения $A(X_A, Y_A)$ окружностей круга и детали, $C_1 = R - r$.

При выведении формул (4) и (5) h^2 была приравнена 0 как величина бесконечно малая второго порядка по сравнению с другими входящими в формулу величинами.

В результате преобразований получена формула для расчета длины дуги контакта абразивного круга с обрабатываемой деталью:

$$l = 2 \cdot \int_{\frac{C_1 \cdot (r-h)}{C_1+h}}^r \sqrt{1 + (Y')^2} dx, \quad (7)$$

$$Y = \sqrt{r^2 - X^2} \rightarrow Y' = -\frac{X}{\sqrt{r^2 - X^2}}, \quad (8)$$

где $Y^2 + X^2 = r^2$

Подставляя Y' из формулы (8) в формулу (7), получим

$$l = r \cdot \arcsin \frac{X}{r} \Big|_{\frac{C_1(r-h)}{C_1+h}}^r = r \cdot \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{C_1 \cdot (r-h)}{r \cdot (C_1 + 2h)} \right]. \quad (9)$$

Подставляя значения (8) в формулу (2), получим выражение для площади контактирующей (активной) режущей поверхности шлифовального круга:

$$S = l \cdot b = r \cdot H \cdot \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{C_1 \cdot (r-h)}{r \cdot (C_1 + 2h)} \right]. \quad (10)$$

Формула (10) позволяет определить площадь контактирующей (активной) режущей поверхности круга и детали (поверхности резания) при любых размерах круга и отверстия в детали, полученных либо с датчиков, либо рассчитанных аналитически. Зная площадь поверхности резания, можно точно рассчитывать и контролировать усилие резания и адекватность процессу шлифования величины поперечной подачи суппорта. В формуле величина h может приравниваться поперечной подаче V_c .

При выводе формул (8) и (9) за траекторию относительного перемещения активного режущего элемента, как и в известной литературе по шлифованию, в том числе и по врезному, принималась дуга окружности. В действительности, из-за непрерывности процесса врезного шлифования траекторией перемещения режущих элементов является кривая, отличная от окружности, больше напоминающая спираль Архимеда.

С учетом формулы спирали Архимеда

$$\rho = K_{cn} \cdot \varphi = \frac{a}{2\pi} \varphi, \quad (11)$$

получена формула для определения величины текущего («мгновенного») радиуса шлифования r :

$$r = r_0 + V_c \cdot n_t + K_{cn} \cdot \varphi = r_0 + V_c \cdot n_t + \frac{V_c}{2\pi} \cdot \varphi = r_0 + V_c \cdot \left(n_t + \frac{\varphi}{2\pi} \right), \quad (12)$$

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.

Из формулы (12) видно, что текущий радиус r вращения режущего элемента непрерывно увеличивается – за каждый оборот детали ($\varphi = 2\pi$) радиус вращения активного режущего элемента будет увеличиваться на V_c (V_c – поперечная подача суппорта на один оборот детали) благодаря врезанию в деталь). С увеличением r будет непрерывно увеличиваться линейная скорость перемещения абразивного режущего элемента по шлифуемой поверхности детали и связанная с ней потребляемая мощность двигателя привода вращения детали. Согласно [8] линейная скорость при вращательном движении материальной точки (в нашем случае абразивного режущего элемента) равна

$$V = r\omega. \quad (13)$$

Тогда для врезного шлифования линейная текущая (мгновенная) скорость перемещения режущего активного элемента по шлифуемой поверхности детали с учетом формул (11) и (12) будет равна

$$V = r \cdot \omega = \left[r_0 + V_c \cdot \left(n_t + \frac{\varphi}{2\pi} \right) \right] \cdot \omega. \quad (14)$$

где ω – угловая скорость вращения детали.

В то же время скорость резания при увеличении диаметра отверстия может быть принята для данных размеров круга и детали при снятии припуска на чистовых переходах постоянной. Тогда колебания площади и скорости контактирующей (активной) режущей поверхности круга и детали не сказываются на глубине резания: при врезном шлифовании и постоянной скорости резания; при неизменных режущей способности круга и свойствах материала обрабатываемых деталей; при ширине шлифования $b = \text{const}$. Сила резания F в установившемся режиме будет определяться лишь фактической толщиной среза a_d :

$$F = f_3(a_d). \quad (15)$$

Под толщиной среза a_d здесь понимается некоторая приведенная (интегральная) толщина срезаемой стружки металла, которая фактически обусловлена параметрами множества микростружек, снимаемых элементарными зернами шлифовального круга в текущий момент времени.

В работе [6] автором рассматривается снимаемый с детали при врезном шлифовании припуск (толщина среза) $a_0(p)$ как сумма припусков $a_d(p)$ – основного (расчетного) припуска, снимаемого с детали, $a_{ИК}(P)$ – приращения припуска из-за износа круга, $a_{УД}(p)$ – упругой деформации технологической системы, – и приводятся выведенные им формулы

$$a_0(p) = a_d(p) + a_{ИК}(p) + a_{УД}(p). \quad (16)$$

Несмотря на то, что сьем припуска при врезном шлифовании, рассматриваемом в схеме принятой В. Н. Михелькевичем, и происходящем по дуге окружности, а не по кривой Архимеда (в этом случае расчетные формулы были бы более точными), основные закономерности, выведенные им для определения толщины среза за один оборот детали, могут быть приняты для построения динамической модели системы.

Так как при врезном шлифовании основная зависимость – это зависимость между силой резания и скоростью поперечной подачи, то если за входную переменную шлифовального станка $x_{вх}(t)$ принять функцию изменения скорости поперечной подачи $v_c(t)$, а за выходную переменную $x_{вых}(t)$ – соответствующую ей функцию изменения радиальной силы $F_y(t)$, то передаточная функция ОУ будет равна

$$W_c(p) = \frac{F_y(p)}{V_c(p)}. \quad (17)$$

С учетом обратной связи по упругой деформации системы и обратной связи по износу круга получим обобщенную модель ДС при врезном шлифовании.

Отличительной особенностью врезного шлифования с точки зрения управления является инерционность воздействия связанных с ним физических процессов на параметры обработки. Например, после кратковременного действия дискретного источника тепла в любом звене системы вызываемые им температурные изменения в детали (увеличение размеров) могут идти

сравнительно длительное время уже после прекращения функционирования источника тепла. То же может быть сказано и о реакции управляющей системы на колебания съема металла при неравномерном припуске, которая может последовать также не сразу и т.д. Поэтому для инерционных процессов обработки (а это относится не только к шлифованию, но и к любому управляемому технологическому процессу металлообработки), режимы обработки рассчитываются, как правило, за определенный промежуток времени, например, подача 1 мм в минуту или 1 мм за 1 оборот. Для учета подобных допущений в моделях управляющих систем вводятся элементы запаздывания в структуру ДС, что повышает точность и адекватность описания подобных систем управления и их передаточных функций.

Для обобщенной структурной схемы процесса врезного внутреннего шлифования доработаны базовые формулы [6], что позволило получить уточненную передаточную функцию ДС:

$$W(p) = \frac{F_Y(p)}{V_c(p)} = \frac{\frac{K_{рез}}{p} \cdot (1 - e^{-p\tau_d})}{1 + \frac{K_{рез}}{p} \cdot (1 - e^{-p\tau_d}) \cdot (K_{УС} \cdot p + K_{ИК})}. \quad (18)$$

После разложения в ряд Пада с точностью (2/2) экспоненциальной функции $(1 - e^{-p\tau_d})$ и алгебраических преобразований формула (18) приняла вид

$$W(p) = \frac{12\tau_d \cdot K_{рез}}{\tau_d^2 p^2 + 6\tau_d p + 12 + 12\tau_d \cdot K_{рез} \cdot (K_{УС} \cdot p + K_{ИК})}. \quad (19)$$

Учитывая, что ДС включает совокупность параллельно соединенных шпиндельных узлов (ШУ) детали и инструмента, $W_{УС}(p) = W_{и}(p) + W_{д}(p)$. Тогда обобщенная структурная схема процесса врезного внутреннего шлифования будет иметь вид, приведенный на (рис. 2), а соответствующая ей передаточная функция преобразуется к виду

$$W(p) = \frac{F_Y(p)}{V_c(p)} = \frac{\frac{K_{рез}}{p} \cdot (1 - e^{-p\tau_d})}{1 + \frac{K_{рез}}{p} \cdot (1 - e^{-p\tau_d}) \cdot [K_{УС} \cdot p \cdot (W_{и}(p) + W_{д}(p)) + K_{ИК}]}. \quad (20)$$

Передаточные функции ШУ детали $W_{д}(p)$ и ШУ инструмента $W_{и}(p)$ в общем случае имеют сложную структуру, образованную совокупностью колебательных звеньев [6].

С целью упрощения передаточной функции $W(p)$ ШУ инструмента и ШУ детали рассматриваются как колебательные звенья с одной основной частотой, а именно:

$$W_{и}(p) = \frac{h_{и}}{T_{и}^2 p^2 + 2\gamma_{и} T_{и} p + 1}, \quad W_{д}(p) = \frac{h_{д}}{T_{д}^2 p^2 + 2\gamma_{д} T_{д} p + 1}. \quad (21)$$

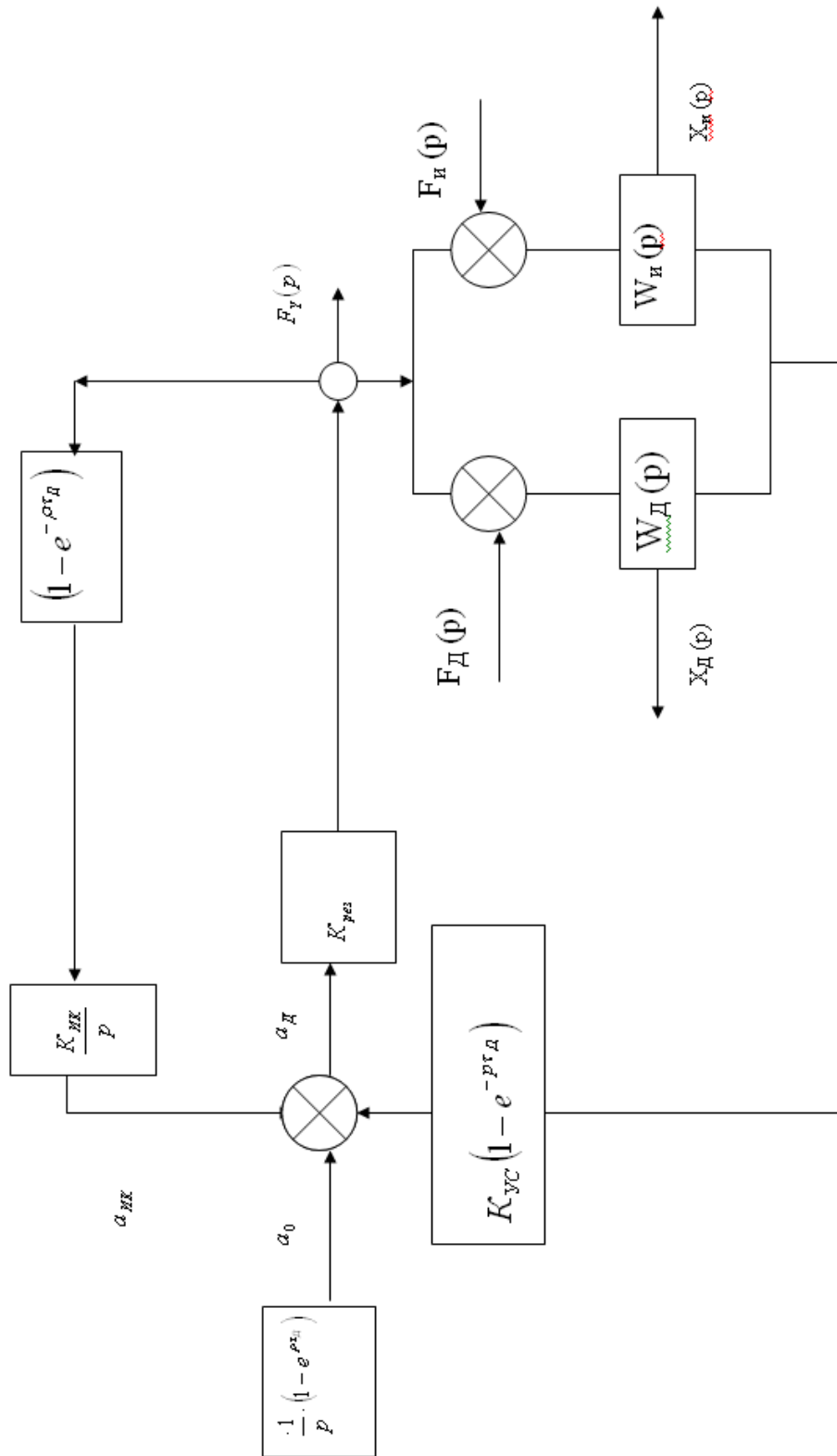


Рис. 2. Структурная схема динамической системы с учетом уточненной схемы съема припуска

Подставив значения (21) в (20), получим

$$W(p) = \frac{1}{\tau_d^2 p^2 + 6\tau_d p + 12 + 12\tau_d K_{рез}} \times \\ \times \frac{12\tau_d K_{рез}}{K_{УС} p \left(\frac{h_{и}}{T_{и}^2 p^2 + 2\gamma_{и} T_{и} p + 1} + \frac{h_{д}}{T_{д}^2 p^2 + 2\gamma_{д} T_{д} p + 1} \right) + K_{ИК}}. \quad (22)$$

или в форме многочлена:

$$W(p) = \frac{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}{b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}, \quad (23)$$

где a_i, b_j – постоянные коэффициенты, вычисляемые по коэффициентам передаточных функций звеньев ДС.

В нашем случае введение в структуру ДС передаточных функций $W_{и}(p)$ и $W_{д}(p)$ повысило порядок характеристического уравнения со второго до четвертого, что способствовало повышению точности и адекватности описания ДС.

Анализ передаточной функции позволяет установить такую характеристику качества, как запас устойчивости ДС [4], которую можно использовать для обоснования выбора режима обработки на станке, обеспечивающего высокое качество обработки деталей, например: минимальные значения некруглости, огранки, волнистости и однородности физико-механических свойств поверхностного слоя дорожек качения колец подшипников при шлифовании [6].

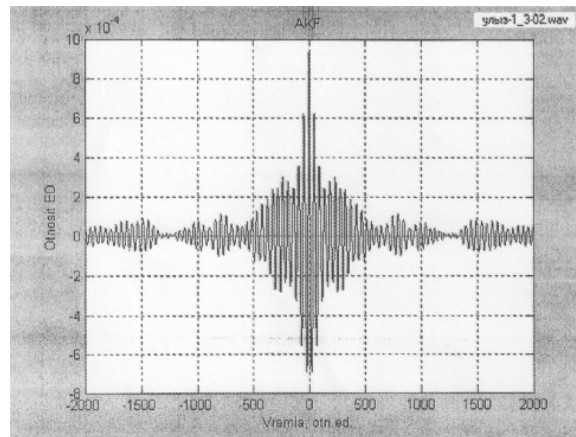
Вычисление по теоретической функции (23) затруднено, так как необходим расчет всех коэффициентов, что требует проведения большого объема дополнительных экспериментов.

Для определения реальной 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 с условием, 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 следующей формулы:

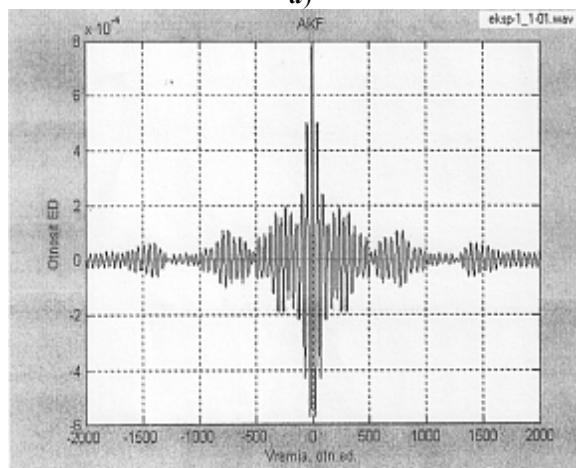
$$W(p) \cdot W(-p) [X(p) + X(-p)] = K_y(p) + K_y(-p), \quad (24)$$

где $K_y(p)$ – изображение по Лапласу АКФ $K_y(\tau)$; $X(p)$ – изображение входного воздействия.

При реализации метода принято, что процесс шлифования является квазистационарным (переходный процесс заканчивается за 1,0–1,5 с), характеристики ДС при обработке одного кольца не изменяются, т.е. ДС рассматривается как линейная. Для вычисления АКФ использовался программный продукт Matlab. Типичный вид АКФ ВА колебаний опоры кольца $K(\tau)$ при шлифовании на станке SIW-5 при различных подачах круга показан на рис. 3.



а)



б)

Рис. 3. Типичный вид автокорреляционных функций:
а – подача 0,3 мм/мин; б – подача 0,4 мм/мин

Полученные по результатам измерений ВА колебаний ДС шлифовального станка АКФ с достаточной для практики точностью порядка 10–15 % могут быть аппроксимированы формулой

$$K(\tau) = Ae^{-\alpha\tau}(1 + \cos\Omega\tau)\cos\omega_0\tau, \quad (25)$$

где $A = K(0)$; α – коэффициент затухания экспоненты; Ω – круговая частота низкочастотной составляющей АКФ (огибающей); ω_0 – круговая частота основной составляющей АКФ.

Проверка модели (25) на адекватность проводилась по критерию Фишера. Численные значения параметров АКФ получаются известными методами, что позволяет в дальнейшем вычислить реальную передаточную функцию замкнутой ДС шлифовального станка при стационарном резании по формуле

$$K(p) + K(-p) = W(p)W(-p), \quad (26)$$

где $K(p)$ – изображение по Лапласу $K(\tau)$.

Покажем, как аналитически получается выражение для передаточной функции из формулы (25) с учетом формулы (26).

Используя известные тригонометрические преобразования для произведения косинусов, получаем выражение виброакустических колебаний динамической системы при различных подачах круга:

$$K(\tau) = A \left[e^{-\alpha\tau} \cos \omega_0 \cdot \tau + \frac{1}{2} e^{-\alpha\tau} \cos(\omega_0 + \Omega)\tau + \frac{1}{2} e^{-\alpha\tau} \cos(\omega_0 - \Omega)\tau \right]. \quad (27)$$

Применяя преобразование Лапласа [4], получаем

$$K(p) = A \left[\frac{p + \alpha}{(p + \alpha)^2 + \omega_0^2} + \frac{1}{2} \frac{p + \alpha}{(p + \alpha)^2 + (\omega_0 + \Omega)^2} + \frac{1}{2} \frac{p + \alpha}{(p + \alpha)^2 + (\omega_0 - \Omega)^2} \right]. \quad (28)$$

Выполняя алгебраические преобразования с приведением выражения (28) к общему знаменателю, упрощаем числитель выражения за счет пренебрежения величиной Ω по сравнению с ω_0 , тогда получаем достаточно простое выражение для $K(p)$:

$$K(p) = \frac{2(p + \alpha) \left[(p + \alpha)^2 + \omega_0^2 \right]}{\left[(p + \alpha)^2 + (\omega_0 + \Omega)^2 \right] \left[(p + \alpha)^2 + (\omega_0 - \Omega)^2 \right]}. \quad (29)$$

Соответственно выражение для $K(-p)$ имеет вид

$$K(-p) = \frac{2(-p + \alpha) \left[(-p + \alpha)^2 + \omega_0^2 \right]}{\left[(-p + \alpha)^2 + (\omega_0 + \Omega)^2 \right] \left[(-p + \alpha)^2 + (\omega_0 - \Omega)^2 \right]}. \quad (30)$$

Произведем сложение выражений (29) и (30), причем упрощаем числитель промежуточного выражения за счет пренебрежения величиной α по сравнению с ω_0 . После алгебраических преобразований с учетом формулы (26) получаем для передаточной функции замкнутой ДС шлифовального станка выражение

$$W_3(p) = A \frac{\sqrt{\alpha} \cdot (p + \omega_0) \cdot \left[(p + \alpha)^2 + \omega_0^2 \right]}{\left[(p + \alpha)^2 + (\omega_0 + \Omega)^2 \right] \left[(p + \alpha)^2 + (\omega_0 - \Omega)^2 \right]}, \quad (31)$$

или в форме многочлена:

$$W(p) = \frac{B_3 p^3 + B_2 p^2 + B_1 p + B_0}{A_4 p^4 + A_3 p^3 + A_2 p^2 + A_1 p + A_0}. \quad (32)$$

Графики АКФ аппроксимированы (25) и на ее основе путем математических преобразований получена передаточная функция 4-го порядка, вид которой совпадает с теоретически полученной (23).

Оценку устойчивости замкнутой ДС целесообразно выполнить по критерию Михайлова [4] на основе вычисления минимального расстояния от кривой Михайлова до начала координат на комплексной плоскости $\{Re M(j\omega), Im M(j\omega)\}$, где $M(j\omega)$ – характеристический многочлен передаточной функции $W_3(j\omega)$; $Re M(j\omega)$, $Im M(j\omega)$ – действительная и мнимая части $M(j\omega)$

$$M(j\omega) = \left[(j\omega + \alpha)^2 + (\omega_0 + \Omega)^2 \right] \left[(j\omega + \alpha)^2 + (\omega_0 - \Omega)^2 \right]. \quad (33)$$

Экспериментально установлено, что при изменении подачи круга величины ω_0 и Ω меняются незначительно, а основные изменения АКФ связаны с изменением величины α , которое определяет изменение положения годографа Михайлова относительно начала координат, т.е. изменение запаса устойчивости. В среде Mathcad разработана программа для вычисления минимального расстояния от начала координат до годографов Михайлова, т.е. запаса устойчивости системы при реализации подач 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 мм/мин.

Запас устойчивости ДС сопоставлялся с качеством поверхностного слоя шлифованных дорожек качения колец, которые оценивались вихретоковым методом в баллах по специальному классификатору (рис. 4).

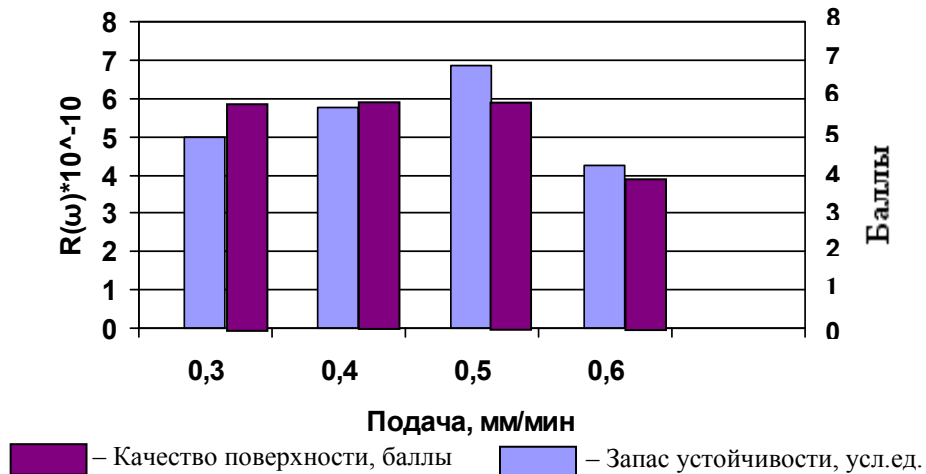


Рис. 4. Зависимость запаса устойчивости и качества поверхности дорожек качения колец подшипников от подачи круга

Измерения вибраций и качества поверхности выполнены на каждой подаче для трех последовательно обработанных колец, произведено усреднение. Стандартное отклонение по качеству колец составляет не более 0,4 баллов, т.е. не превышает 8 %, а по запасу устойчивости – не более 5 %.

Из рис. 4 можно сделать вывод, что при повышении подачи от 0,3 до 0,5 мм/мин запас устойчивости незначительно возрастает. Однако с увеличением подачи до 0,6 мм/мин запас устойчивости снижается и ухудшается качество поверхностного слоя дорожки качения кольца подшипника, что под-

тверждается данными вихретокового контроля. Это объясняется большой скоростью съема припуска при подаче 0,6 мм/мин. Следовательно, рациональной подачей при предварительном проходе является 0,5 мм/мин, на которой обеспечивается заданное качество поверхности и наибольшая производительность.

Таким образом, данную методику определения рационального режима по максимуму запаса устойчивости ДС, выбранному из полученных для различных подач, рекомендуется применять при предварительном шлифовании и на черновых проходах, когда подача круга достаточно велика. При этом достигается хорошее качество поверхности качения колец при практически максимальной производительности, что способствует получению их высокого качества после чистовых операций шлифования.

Список литературы

1. **Кудинов, В. А.** Динамика станков / В. А. Кудинов. – М. : Машиностроение, 1967. – 360 с.
2. **Игнатъев, А. А.** Стохастические методы идентификации в динамике станков : моногр. / А. А. Игнатъев, В. А. Каракозова, С. А. Игнатъев. – Саратов : Изд-во СГТУ им. Ю. А. Гагарина, 2013. – 124 с.
3. **Игнатъев С. А.** Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции / С. А. Игнатъев, В. В. Горбунов, А. А. Игнатъев. – Саратов : Изд-во СГТУ, 2009. – 160 с.
4. **Егоров, К. В.** Основы теории автоматического регулирования / К. В. Егоров. – М. : Энергия, 1967. – 648 с.
5. **Игнатъев А. А.** Основы теории идентификации объектов управления / А. А. Игнатъев, С. А. Игнатъев. – Саратов : Изд-во СГТУ, 2008. – 44 с.
6. **Михелькевич, В. Н.** Автоматическое управление шлифованием / В. Н. Михелькевич. – М. : Машиностроение, 1975. – 34 с.
7. **Зубарев, Ю. М.** Математическое описание процесса шлифования / Ю. М. Зубарев // Инструмент и технологии. – 2004. – № 17–18. – С. 157–161.
8. **Яворский, Б. М.** Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М. : Наука, 1968. – 940 с.

References

1. Kudinov V. A. *Dinamika stankov* [Machine tools' dynamics]. Moscow: Mashinostroenie, 1967, 360 p.
2. Ignat'ev A. A., Karakozova V. A., Ignat'ev S. A. *Stokhasticheskie metody identifikatsii v dinamike stankov: monogr.* [Stochastic methods of identification in machine tools' dynamics: monograph]. Saratov: Izd-vo SGTU im. Yu. A. Gagarina, 2013, 124 p.
3. Ignat'ev S. A., Gorbunov V. V., Ignat'ev A. A. *Monitoring tekhnologicheskogo protsesssa kak element sistemy upravleniya kachestvom produktsii* [Technological process monitoring as an element of production quality control system]. Saratov: Izd-vo SGTU, 2009, 160 p.
4. Egorov K. V. *Osnovy teorii avtomaticheskogo regulirovaniya* [Basic automatic control theory]. Moscow: Energiya, 1967, 648 p.
5. Ignat'ev A. A., Ignat'ev S. A. *Osnovy teorii identifikatsii ob'ektov upravleniya* [Basic theory of control object identification]. Saratov: Izd-vo SGTU, 2008, 44 p.
6. Mikhel'kevich V. N. *Avtomaticheskoe upravlenie shlifovaniem* [Grinding automatic control]. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 34 p.
7. Zubarev Yu. M. *Instrument i tekhnologii* [Instrument and technologies]. 2004, no. 17–18, pp. 157–161.

8. Yavorskiy B. M., Detlaf A. A. *Spravochnik po fizike* [Physics reference book]. Moscow: Nauka, 1968, 940 p.
-

Игнатъев Александр Анатольевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой автоматизации,
управления, мехатроники, Саратовский
государственный технический
университет имени Ю. А. Гагарина
(Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77)

E-mail: atp@sstu.ru

Каракозова Вера Алексеевна
кандидат технических наук, доцент,
кафедра автоматизации, управления,
мехатроники, Саратовский
государственный технический
университет имени Ю. А. Гагарина
(Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77)

E-mail: atp@sstu.ru

Зорин Анатолий Иванович
инженер первой категории, лаборатория
кафедры автоматизации, управления,
мехатроники, Саратовский
государственный технический
университет имени Ю. А. Гагарина
(Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77)

E-mail: atp@sstu.ru

Ignat'ev Aleksandr Anatol'evich
Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of automation,
control, mechatronics, Saratov State
Technical University named after
Y. A. Gagarin (77 Politekhnikeskaya
street, Saratov, Russia)

Karakozova Vera Alekseevna
Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of automation,
control, mechatronics, Saratov State
Technical University named after
Y. A. Gagarin (77 Politekhnikeskaya
street, Saratov, Russia)

Zorin Anatoliy Ivanovich
Engineer of the first category, laboratory
of sub-department of automation, control,
mechatronics, Saratov State Technical
University named after Y. A. Gagarin
(77 Politekhnikeskaya street,
Saratov, Russia)

УДК 621.923.

Игнатъев, А. А.

Моделирование и идентификация динамической системы шлифовального станка, определяющей качество поверхности качения колец подшипников на финишных операциях / А. А. Игнатъев, В. А. Каракозова, А. И. Зорин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 2 (30). – С. 62–76.