

## **Дослідження процесів механічного оброблення матеріалів та розробка прогресивних способів їх реалізації**

УДК 621.923:621.90.17

### **СТОХАСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ ПРИ ПЛОСКОМ НАРУЖНОМ ШЛИФОВАНИИ**

**Братан С.М., Каинов Д.А., Сидоров Д.Е.**  
*(СевНТУ, г. Севастополь, Украина)*

#### **Введение**

Качество обрабатываемых изделий зависит как от качества заготовки, технологии обработки, динамики станка, так и от качества инструмента. Исследования операций шлифования показывают [1, 2], что, как правило, в начальный момент времени при правильном подборе характеристик инструмента, режимов резания, оптимальном построении цикла шлифования, обеспечиваются заданные параметры точности и шероховатости поверхности детали. Из всех элементов технологической системы только шлифовальный круг и заготовка претерпевают существенные изменения в относительно короткий промежуток времени. Изменение состояния инструмента оказывает существенное влияние на ход технологического процесса, так как профиль инструмента копируется на поверхности заготовки [3].

Наличие колебаний в отклонениях расположения и шероховатости поверхности объясняются возмущающими воздействиями в технологических процессах, вызванными нестабильностью технологической системы [4]. То есть нестабильность параметров деталей определяется воздействием в процессе их производства на технологическую систему (ТС) изменяющихся внешних факторов, часть из которых неизвестна и не контролируется в процессе обработки [5]. Эта проблема особенно актуальна для финишных операций, на которых окончательно формируются параметры качества готовых изделий и которые наиболее чувствительны к возмущающим воздействиям.

В современных условиях порядка 15...20% финишных операций осуществляется методами плоского наружного шлифования [6]. Это определяет актуальность дальнейшего усовершенствования таких операций. Задача повышения их производительности при обеспечении стабильности требуемых параметров качества требует учета влияния возмущающих факторов в ходе протекания финишного технологического процесса.

В настоящее время плоское наружное шлифование осуществляется с применением традиционных методов, не в полной мере учитывающих влияние случайных факторов, снижающих стабильность показателей качества производимых изделий. Для стабилизации показателей качества технологические режимы назначаются, исходя из неблагоприятных условий, например, возобновление режущих свойств изношенного шлифовального круга производится значительно раньше, чем того требует его действительное состояние. При прогнозировании состояния ТС используются традиционные детерминированные модели протекания технологического процесса (ТП), осуществляемые с применением традиционных режимов резания, способов диагностики и управления [7].

Вместе с тем, процессы шлифования имеют сложную стохастическую природу, что приводит к разбросу показателей качества изделий и не позволяет использовать все возможности финишных методов.

Таким образом, для процессов чистовой обработки на плоскошлифовальных станках **возникает задача диагностики** – необходимость определения в процессе обработки ряда параметров технологической системы (ТС), в том числе и недоступных непосредственному измерению, **что и является целью данной статьи**. К таким параметрам относится, например, фактическая глубина резания.

### Основная часть

Задача оценки фактической глубины шлифования может быть решена с использованием теории динамических наблюдателей [8], имеющих структуру, приведенную на рисунке 1.

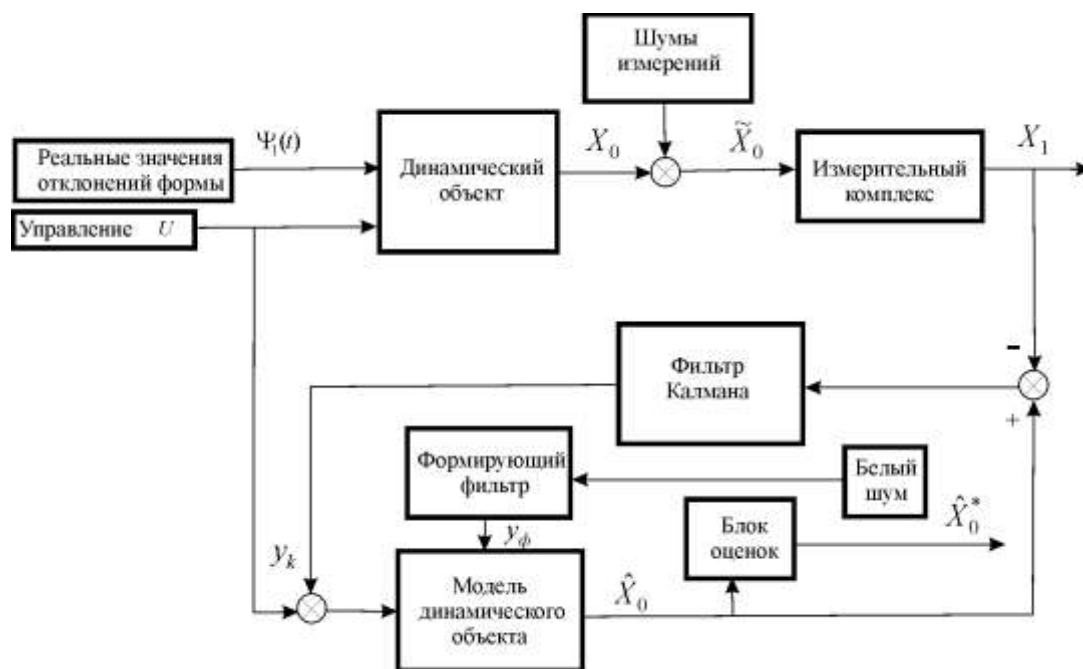


Рис 1. Схема стохастической диагностики

Для этого необходимо математическое описание процесса, характеризующего динамику взаимодействия шлифовального круга и заготовки.

Для процесса плоского наружного шлифования схема взаимодействия имеет вид, представленный на рисунке. 2.

Учет изменения и оценка воздействия возмущающих факторов на технологический процесс требует построения соответствующего математического описания. К такому описанию необходимо отнести динамические модели технологического процесса и соответствующие математические модели воздействующих факторов.

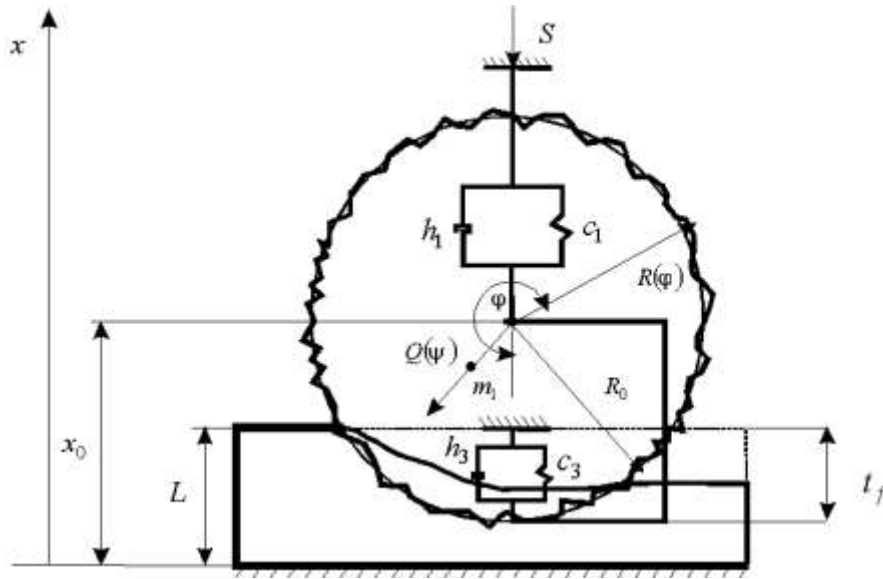


Рис 2. Эквивалентная схема динамической системы плоскошлифовального станка

С использованием принципа Даламбера, с учетом того, что обрабатываемая деталь жестко закреплена, модель динамики процесса плоского наружного шлифования представлена в виде

$$m_1 \ddot{x} + h_1 \dot{x} + c_1 x = h_3 \dot{t}_f + c_3 t_f - c_1 s - h_1 \dot{s}, \quad (1)$$

где, в соответствии с рисунком 1,  $m_1$  – приведенная масса шлифовального круга и шлифовальной бабки;  $h_1$  – приведенный коэффициент демпфирования шлифовального круга;  $c_1$  – приведенная жесткость шлифовального круга и шлифовальной бабки;  $h_3$  – демпфирование зоны контакта шлифовального круга с деталью;  $c_3$  – жесткость зоны контакта шлифовального круга с деталью;  $t_f$  – фактическая глубина резания;  $x$  – расстояние от базовой поверхности до центра вращения круга;  $s$  – перемещение за счет подачи.

После подстановки  $t_f = L + R - x$  в выражение (1), получим

$$m_1 (\ddot{x}_0 + \Delta \ddot{x}) + h_1 (\dot{x}_0 + \Delta \dot{x}) + c_1 (x_0 + \Delta x) = h_3 (\dot{L}_0 + \Delta \dot{L} + \dot{R}_0 + \Delta \dot{R} - \dot{x}_0 - \Delta \dot{x}) + c_3 (L_0 + \Delta L + R_0 + \Delta R - x_0 - \Delta x) - c_1 (s_0 + \Delta s) - h_1 (\dot{s}_0 + \Delta \dot{s}), \quad (2)$$

где  $L$  – толщина заготовки (расстояние от стола до поверхности детали);  $R$  – радиус шлифовального круга по направлению к обрабатываемой детали.

При условии отсутствия дисбаланса (центр вращения совпадает с центром масс) и с учетом того, что толщина детали  $L$  и радиус шлифовального круга  $R$  имеют отклонения от номинальных значений, т.е.  $s = s_0 + \Delta s$ ,  $L = L_0 + \Delta L$ ,  $R = R_0 + \Delta R$ , координата положения шлифовального круга также имеет отличия от номинального значения  $x_0$ , т.е.  $x = x_0 + \Delta x$ , при подстановке  $\Delta x = 0$ ,  $\Delta L = 0$ ,  $\Delta R = 0$ ,  $\Delta s = 0$  в зависимость (2), получено следующее выражение:

$$m_1\ddot{x}_0 + h_1\dot{x}_0 + c_1x_0 = h_3(\dot{L}_0 + \dot{R}_0 - \dot{x}_0) + c_3(L_0 + R_0 - x_0) - c_1s_0 - h_1\dot{s}_0. \quad (3)$$

Записывая разность выражений (2) и (3), построим уравнение движения центра шлифовального круга в отклонениях:

$$m_1\Delta\ddot{x} + h_1\Delta\dot{x} + c_1\Delta x = h_3(\Delta\dot{L} + \Delta\dot{R} - \Delta\dot{x}) + c_3(\Delta L + \Delta R - \Delta x) - c_1\Delta s - h_1\Delta\dot{s}. \quad (4)$$

Если вращение шлифовального круга осуществляется не вокруг центра масс, то возникает сила, характеризующая влияние дисбаланса.

С учетом дисбаланса  $Q(\Psi) = P_{\max} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$ , равенство (4) примет вид:

$$m_1\Delta\ddot{x} + h_1\Delta\dot{x} + c_1\Delta x = h_3(\Delta\dot{L} + \Delta\dot{R} - \Delta\dot{x}) + c_3(\Delta L + \Delta R - \Delta x) - c_1\Delta s - h_1\Delta\dot{s} + \Delta Q.$$

Далее, для простоты опуская знак  $\Delta$ , запишем уравнение, характеризующее процесс шлифования, в виде:

$$m_1\ddot{x} + \dot{x}(h_1 + h_3) + x(c_1 + c_3) = h_3\dot{L} + c_3L + h_3\dot{R} + c_3R - h_1\dot{s} - c_1s + Q. \quad (5)$$

Учитывая, что выражение (5) является дифференциальным уравнением второго порядка, обозначим  $x = y_1$  и используем для понижения порядка (5) стандартную процедуру. Получим два дифференциальных уравнения первого порядка:

$$\dot{y}_1 = y_2;$$

$$\dot{y}_2 = -y_2 \frac{(h_1 + h_3)}{m_1} - y_1 \frac{(c_1 + c_3)}{m_1} + \frac{h_3\dot{L}}{m_1} + \frac{c_3L}{m_1} + \frac{h_3\dot{R}}{m_1} + \frac{c_3R}{m_1} - \frac{h_1\dot{s}}{m_1} - \frac{c_1s}{m_1} + \frac{F(t)}{m_1},$$

которые в векторно-матричном виде запишутся так:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{(c_1 + c_3)}{m_1} & -\frac{(h_1 + h_3)}{m_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{h_3}{m_1} & \frac{c_3}{m_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{L} \\ L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{h_3}{m_1} & \frac{c_3}{m_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{R} \\ R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{h_3}{m_1} & \frac{c_3}{m_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{s} \\ s \end{bmatrix} + [0 \quad 1] \frac{F(t)}{m_1}. \quad (6)$$

В состав выражения (6) входят вариации форм шлифовального круга и заготовки. В соответствии с моделью (6) основными параметрами шлифовального круга и заготовки, оказывающими влияние на динамику процесса обработки, являются статические и динамические вариации его профиля. Под статическими вариациями понимаются отклонения формы круга от идеальной в статическом режиме, а под динамическими – отклонения формы, вызываемые непосредственно процессом обработки. К последним можно отнести и отклонения траектории поверхности круга от заданной вследствие его дисбаланса. Эти отклонения имеют детерминированный характер и могут быть существенно уменьшены известными технологическими методами, например, предварительной балансировкой круга. Отклонения формы шлифовального круга и за-

готовки в статическом режиме имеют случайный характер и при анализе процесса обработки могут быть учтены путем введения в состав системы (6) дополнительных звеньев (соответствующих формирующих фильтров). Такие фильтры могут быть построены на основе анализа профиля для любого конкретного шлифовального круга заготовки с представлением воздействия на систему (6) в пространстве состояний в виде уравнений состояния (8) и наблюдения (9) [9, 10]:

– для шлифовального круга

$$\dot{\Psi} = F_{\Psi}\Psi + G_{\Psi}\Omega_{\Psi}, \quad (7)$$

$$z_1 = D_1G_1 + E_1v_1, \quad (8)$$

где  $\psi = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix}$ ,  $F_{\Psi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix}$ ,  $G_{\Psi} = \begin{bmatrix} KT_3 \\ -1 - KT_2T_3 \end{bmatrix}$ ,  $D_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T$ ,  $E_1 = \rho$ ,

$\Omega_{\Psi}$ ,  $v_1$  – некоррелированные единичные, порождающие гауссовские, белые шумы,

$$T_1 = \frac{1}{v^2(\alpha^2 + \beta^2)}, \quad T_2 = \frac{2\alpha}{v(\alpha^2 + \beta^2)}, \quad T_3 = \frac{1}{v(\alpha^2 + \beta^2)}, \quad K = \sqrt{2} \sqrt{\frac{D\alpha}{v(\alpha^2 + \beta^2)}}, \quad D -$$

дисперсия высот неровностей рельефа шлифовального круга,  $v$  – скорость его движения,  $\alpha, \beta$  – соответствующие коэффициенты корреляции;

– для заготовки:

$$\dot{\Phi} = F_{\phi}\Phi + G_{\phi}\Omega_{\phi}, \quad (9)$$

$$z_2 = D_2G_2 + E_2v_2, \quad (10)$$

где  $\Phi = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix}$ ,  $A_{\phi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix}$ ,  $G_{\phi} = \begin{bmatrix} KT_3 \\ -1 - KT_2T_3 \end{bmatrix}$ ,  $D_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T$ ,  $E_2 = \rho$ ,

$\Omega_{\phi}$ ,  $v_2$  – некоррелированные единичные, порождающие гауссовские, белые шумы,

$$T_4 = \frac{1}{v^2(\alpha_2^2 + \beta_2^2)}, \quad T_5 = \frac{2\alpha}{v(\alpha_2^2 + \beta_2^2)}, \quad T_6 = \frac{1}{v(\alpha_2^2 + \beta_2^2)}, \quad K_2 = \sqrt{2} \sqrt{\frac{D\alpha}{v(\alpha_2^2 + \beta_2^2)}},$$

$\alpha_2, \beta_2$  – соответствующие коэффициенты корреляции.

$$\begin{bmatrix} \dot{Y} \\ \dot{\Psi} \\ \dot{\Phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0 & 0 & 0 \\ 0 & F_{\Psi} & 0 \\ 0 & 0 & F_{\phi} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y \\ \Psi \\ \Phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_0 & 0 & 0 \\ 0 & G_{\Psi} & 0 \\ 0 & 0 & G_{\phi} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_0 \\ \Omega_{\Psi} \\ \Omega_{\phi} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где

$$F(t) = \begin{bmatrix} F_0 & 0 & 0 \\ 0 & F_{\Psi} & 0 \\ 0 & 0 & F_{\phi} \end{bmatrix}, \quad X(t) = \begin{bmatrix} Y \\ \Psi \\ \Phi \end{bmatrix}, \quad \dot{X}(t) = \begin{bmatrix} \dot{Y} \\ \dot{\Psi} \\ \dot{\Phi} \end{bmatrix}, \quad G(t) = \begin{bmatrix} G_0 & 0 & 0 \\ 0 & G_{\Psi} & 0 \\ 0 & 0 & G_{\phi} \end{bmatrix}, \quad U(t) = \begin{bmatrix} P_0 \\ \Omega_{\Psi} \\ \Omega_{\phi} \end{bmatrix},$$

$$H(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Система (12) представляет стандартную форму описания динамической системы в терминах теории пространства состояний, что позволяет ее использовать для исследования характеристик и поведения процесса плоского шлифования, а также для синтеза систем управления этим процессом.

Для решения задач стохастической диагностики взаимодействия инструмента и заготовки при плоском наружном шлифовании целесообразно записать соотношение (12) в Жордановой клеточной форме совместно с уравнением наблюдений.

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= F(t)X(t) + G(t)U(t); \\ Z(t) &= H(t)X(t) + V(t). \end{aligned} \quad (13)$$

### Выводы

Соотношения (21), (22) позволяют использовать результаты измерений координат в процессе обработки детали с целью построения оценок параметров процесса обработки. Эти оценки являются оптимальными при условии гауссовости шумов измерений и возбуждений.

Полученные результаты могут быть использованы для синтеза систем управления операциями шлифования.

**Список литературы:** 1. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Изд-во Сарат. ун-та, 1979. – 232 с. 2. Ларшин В.П. Статистический контроль работоспособности технологических систем по критерию стабильности// Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. Труды 5-й международной научно-технической конференции ХНПК «ФЭД». – Харьков, 2002. – С. 31-32. 3. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с. 4. Братан С.М. Стабилизация волнистости шлифованных поверхностей за счет построения циклов управления на основе теоретико-вероятностных моделей //Вестник СевГТУ: Сер. Автоматизация процессов и управление: Сб. науч. тр. – Севастополь, 1998. – Вып.14. – С. 157-160. 5. Братан С.М. Идентификация параметров съема при комбинированном шлифовании токопроводных керамических материалов// Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – Вып. 9. – С. 24-32. 6. Рыжов Э.В., Сагарда А.А., Ильицкий В.Б., Чеповецкий И.Х. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке. – Киев: Наук. думка, 1979. – 224 с. 7. Михелькевич В.Н. Автоматическое управление шлифованием. – М.: Машиностроение, 1975. – 304 с. 8. Братан С.М. Синтез подсистемы наблюдений для операции плоского шлифования// Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць ХДПУ. – Харків, 2000. – Вип.1 (3). – С. 22-31. 9. Братан С.М. Экспериментальные исследования случайных размерных параметров шлифовального круга и построение аналитических зависимостей для оценки влияния его рельефа на входные шумы операции шлифования// Нові матеріали і технології в металургії: Научний журнал ЗДТУ. – Запоріжжя, 2000. – Вип. 1. – С. 83-86. 10. Братан С.М.. Управление операцией плоского шлифования с динамиче-

ской стабилизацией параметров технологического цикла// Резание и инструмент в технологических системах. Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. 57. – С. 17-23.

СТОХАСТИЧНА ДІАГНОСТИКА ВЗАЄМОДІЇ ІНСТРУМЕНТУ  
І ЗАГОТОВКИ ПРИ ПЛОСКОМУ ЗОВНІШНЬОМУ ШЛІФУВАННІ

Братан С.М., Каїнов Д.А., Сидоров Д.Є.

В роботі вирішується задача стохастичної діагностики параметрів технологічної системи при реалізації процесу плоского шліфування, які є недоступними для безпосереднього вимірювання.

СТОХАСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНСТРУМЕНТА  
И ЗАГОТОВКИ ПРИ ПЛОСКОМ НАРУЖНОМ ШЛИФОВАНИИ

Братан С.М., Каинов Д.А., Сидоров Д.Е.

В работе решается задача стохастической диагностики параметров технологической системы при реализации процесса плоского шлифования, которые недоступны непосредственному измерению.

STOCHASTIC DIAGNOSTICS OF INTERACTION OF TOOL  
AND WORKPIECE AT FLAT OUTWARD GRINDING

Bratan S.M., Kainov D.A., Sidorov D.E.

In the paper the task of stochastic diagnostics of parameters of the technological system is solved at accomplishment of flat grinding process, which are unavailable to immediate measurement.

*Рецензент: д.т.н., проф. Калафатова Л.П.*