

УДК 621.923:621.90.17

С.Е. Сазонов, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет,

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 99053

tm@sevntu.com.ua

ОЦЕНКА НЕПОСРЕДСТВЕННО НЕИЗМЕРЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ

Предложена методика построения динамических соотношений, не требующих дифференцирования измерений отклонений форм для процесса шлифования.

Ключевые слова: шлифование, шум наблюдения, фильтрация.

Введение. Взаимодействующие шлифовальный круг и заготовка в первую очередь характеризуются параметрами формы шлифовального круга и заготовки, их взаимоположением, упругими, демпфирующими и другими свойствами технологической системы [1]. В качестве математической модели шлифовального круга может рассматриваться тяжелый вращающийся диск, а при ее одномерном представлении – вращающаяся окружность. Центр вращения неизбежно не совпадает с центром формы, что и определяет дисбаланс круга, которым обычно и объясняют появление периодически изменяющихся сил, возникающих при шлифовании. Аналогичное описание имеет и заготовка.

Целью данной статьи является разработка математической модели для оценки непосредственно неизмеряемых параметров

Основное содержание работы. Для процесса круглого наружного шлифования схема взаимодействия имеет вид, представленный на рис. 1

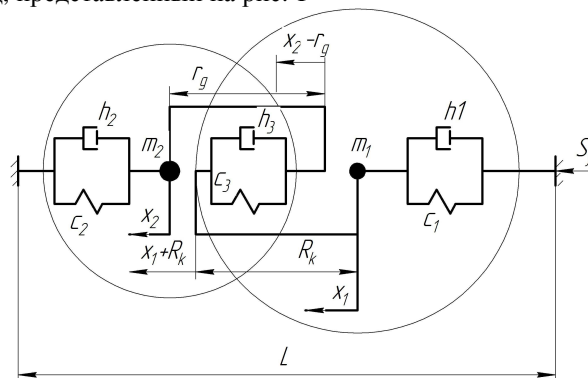


Рисунок 1 – Схема взаимодействия шлифовального круга и заготовки при круглом наружном шлифовании

Для описания процесса введены следующие обозначения: L, x_1, x_2 - межцентровое расстояние, отклонения координат центра шлифовального круга и детали относительно соответствующих положений динамического равновесия, соответственно; R_k, c_1, h_1, m_1 - радиус круга, его приведенная жесткость, коэффициент демпфирования и масса; r_0, c_2, h_2, m_2 - радиус детали, ее приведенная жесткость, коэффициент демпфирования и масса; c_3, h_3 - соответствующие эквивалентные параметры зоны контакта круга и детали.

Межцентровое расстояние L определится как

$$L = R(\phi) + r(\phi) - t_f, \tag{1}$$

где t_f - глубина внедрения режущих зерен круга в материал заготовки, отсчитываемая от ее исходной поверхности.

Соотношения (1) могут содержать периодические (по времени τ или по фазе вращения $\phi(\tau)$ шлифовального круга) компоненты, приводящие к возникновению периодических изменений t_f и периодических сил с соответствующими частотами в удерживающих связях при силовом взаимодействии круга и заготовки. Такие силы являются внутренними для системы шлифовальный круг – заготовка и в существенной степени определяют динамику технологической системы.

При учете поперечной подачи \dot{S} , с учетом температурных y_T и упругих $y_{УП}$ деформаций технологической системы, соотношение (1) должно быть скорректировано и приобретет вид:

$$L(\tau) \leq R(\phi(\tau)) + r(\phi(\tau)) - t_f(\tau) - \int_{\tau_0}^{\tau} \dot{S} d\tau + y_T - y_{УП}. \quad (2)$$

Для обеспечения протекания процесса взаимодействия круга и заготовки значение t_f в (2) должно быть неотрицательной величиной. В случае невыполнения условия (2) отсутствует силовой контакт и, следовательно, взаимодействие круга с заготовкой.

На основе принципа возможных перемещений, для системы, представленной на рис.1, построено ее представление в виде совокупности дифференциальных уравнений, характеризующих динамику перемещений центров круга и детали в процессе круглого наружного шлифования:

$$\begin{cases} m_1 \Delta \ddot{x}_1 + h_1 \Delta \dot{x}_1 + c_1(x_{10} + \Delta x_1) + h_3(\Delta \dot{x}_1 + \Delta \dot{R}) + c_3(x_{10} + \Delta x_1 + R + \Delta R) - \\ - h_3(\Delta \dot{x}_2 - \Delta \dot{r}) - c_3(x_{20} + \Delta x_2 - r - \Delta r) = 0, \\ m_2 \Delta \ddot{x}_2 + h_2 \Delta \dot{x}_2 + c_2(x_{20} + \Delta x_2) + h_3(\Delta \dot{x}_2 - \Delta \dot{r}) + c_3(x_{20} + \Delta x_2 - r - \Delta r) - \\ - h_3(\Delta \dot{x}_1 + \Delta \dot{R}) - c_3(x_{10} + \Delta x_1 + R + \Delta R) - h_2 \dot{L} - c_2(L + \Delta L) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где m_1, m_2 – приведенные массы заготовки с центрами и круга со шпинделем; h_i – коэффициент сопротивления i -того звена; c_i – коэффициент жесткости i -того звена; $x_1 = x_{10} + \Delta x_1$; $x_2 = x_{20} + \Delta x_2$; $x_{10}, x_{20}, \Delta x_1, \Delta x_2$, – координаты центра вращения круга и центра вращения детали и их приращения соответственно; R_k, r_g – радиусы круга и детали; $\Delta R, \Delta r$ – приращения радиусов круга и заготовки, соответственно, вызванные отклонениями их формы; $L, \Delta L$ – межцентровое расстояние и его изменение.

После вычитания из уравнений (3) уравнений удерживающих связей:

$$\begin{cases} c_1 x_{10} + c_3(x_{10} + R_k) - c_3(x_{20} - r_g) = 0, \\ c_2 x_{20} + c_3(x_{20} - r_g) - c_3(x_{10} + R_k) - c_2 L = 0, \end{cases}$$

получим систему уравнений, характеризующих процесс взаимодействия круга и заготовки при шлифовании в отклонениях от номинальных параметров.

Для упрощения записи изменим обозначения приращений координат и их производных, опуская предшествующий им знак приращения Δ .

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + h_1 \dot{x}_1 + c_1 x_1 + h_3(\dot{x}_1 + \dot{R}) + c_3(x_1 + \Delta R) - \\ - h_3(\dot{x}_2 - \dot{r}) - c_3(x_2 - \Delta r) = 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 + h_2 \dot{x}_2 + c_2 x_2 + h_3(\dot{x}_2 - \dot{r}) + c_3(x_2 - \Delta r) - \\ - h_3(\dot{x}_1 + \dot{R}) - c_3(x_1 + \Delta R) - h_2 \dot{L} - c_2 \Delta L = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Целесообразно рассматривать компоненты (4), связанные с отклонениями форм круга и детали и межцентровым расстоянием как внешние воздействия на динамическую систему и перестроить вышеприведенные соотношения, приводя их к форме:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = \frac{1}{m_1} [-(h_1 + h_3)\dot{x}_1 - (c_1 + c_3)x_1 + h_3\dot{x}_2 + c_3x_2] - \\ - \frac{1}{m_1} [h_3(\dot{R} + \dot{r}) - c_3(\Delta R + \Delta r)], \\ \ddot{x}_2 = \frac{1}{m_2} [-(h_2 + h_3)\dot{x}_2 - (c_2 + c_3)x_2 - h_3\dot{x}_1 - c_3x_1] + \\ + \frac{1}{m_2} [h_3(\dot{R} + \dot{r}) + c_3(\Delta R + \Delta r)] + \frac{1}{m_2} [h_2\dot{L} + c_2\Delta L], \end{cases} \quad (5)$$

Первые слагаемые правых частей соотношений (5) представляют собой компоненты с производными отклонений положения центров круга и детали, зависящие непосредственно от внутренних обобщенных координат динамической системы (геометрических и кинематических). Вторые

слагаемые – отражают влияние отклонений форм круга и детали. Третье слагаемое второго уравнения в системе (5) отражает воздействие межцентрового расстояния и скорости его изменения на динамическую систему.

С обозначениями

$$y_1 = x_1, \quad y_2 = \dot{y}_1 = \dot{x}_1, \quad y_3 = x_2, \quad y_4 = \dot{y}_3 = \dot{x}_2$$

система (5) может быть приведена к нормальной форме Коши [1].

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2, \\ \dot{y}_2 = -\frac{1}{m_1}[(c_1 + c_2)y_1 + (h_1 + h_2)y_2 - c_3y_3 - h_3y_4] - \\ - \frac{1}{m_1}[c_3(\Delta R + \Delta r) + h_3(\Delta \dot{R} + \Delta \dot{r})], \\ \dot{y}_3 = y_4, \\ \dot{y}_4 = -\frac{1}{m_2}[(c_2 + c_3)y_3 + (h_2 + h_3)y_4 - c_3y_3 - h_3y_4] + \\ + \frac{1}{m_2}[c_3(\Delta R + \Delta r) + h_3(\Delta \dot{R} + \Delta \dot{r})] + \frac{1}{m_2}[h_2\dot{L} + c_2\Delta L], \end{cases}$$

и записана в матричной форме:

$$\dot{Y}_0 = A_0 \cdot Y_0 + B_0 \cdot \Psi + C_0 \cdot U, \tag{7}$$

где

$$\dot{Y}_0 = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{y}_4 \end{bmatrix}, \quad Y_0 = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix}, \quad B_0 = \begin{bmatrix} B_{01} & B_{02} \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{bmatrix} \Delta L \\ \dot{L} \end{bmatrix}, \quad \Psi = \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{bmatrix}, \quad \Psi_1 = [\Delta R + \Delta r], \quad \Psi_2 = [\Delta \dot{R} + \Delta \dot{r}]$$

$$B_{01} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{c_3}{m_1} \\ 0 \\ -\frac{c_3}{m_2} \end{bmatrix}, \quad B_{02} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{h_3}{m_1} \\ 0 \\ -\frac{h_3}{m_2} \end{bmatrix}, \quad C_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{c_2}{m_2} & \frac{h_2}{m_2} \end{bmatrix},$$

где Y_0 – вектор (матрица-столбец), представляющая вектор состояния системы, \dot{Y}_0 – вектор производных состояний системы, A_0 – матрица, характеризующая динамические свойства системы, B_0 – матрица параметров влияния отклонения формы детали и круга, Ψ – вектор состояний отклонений формы детали и круга от номинальных параметров, C_0 – матрица управления процессом (за счет поперечной подачи), U – вектор управляющих воздействий, связанный с поперечной подачей.

В выражении (7) матрица B_0 представлена в блочном виде в расщепленной по столбцам форме. Целесообразность такого описания будет показана ниже.

Для восстановления представления переменных в виде, соответствующем (6), (7), необходимо построить «уравнение восстановления», которое в данном случае будет иметь выражение:

$$X_0 = D_0 \cdot Y_0, \tag{8}$$

где D_0 – матрица, характеризующая состав оценок параметров пространства состояний структуру их линейных комбинаций.

Если необходимы оценки всего пространства состояний, то D_0 представляет собой единичную матрицу.

Непосредственное применение матричных представлений (7) при моделировании нецелесообразно вследствие необходимости дифференцирования отклонений форм. Это не является ни особенностью матричного представления модели, ни описания динамической системы в отклонениях, а проявляется уже в исходном представлении (3) технологической системы. Для преодоления этих трудностей введем модифицированный вектор состояния системы вида:

$$F = Y_0 - B_{02} \cdot \Psi_1, \quad (9)$$

где Y_0, B_{02}, Ψ_1 – соответствуют выражениям, представленным в зависимости (7).

Из записи соотношения (7) непосредственно следует, что $\dot{\Psi}_1 = \Psi_2$. А из уравнения (9) следует:

$$Y_0 = F + B_{02} \cdot \Psi_1. \quad (10)$$

Известно, например [2], что для любых совместных по форме матриц $\alpha(t)$ и $\beta(t)$ справедливо соотношение $\frac{d[\alpha(t) \cdot \beta(t)]}{dt} = \alpha(t) \frac{d\beta(t)}{dt} + \beta(t) \frac{d\alpha(t)}{dt}$. Производная \dot{Y}_0 вектора состояния (9), полученная с учетом равенства (10) и приведенного выше матричного тождества, имеет вид:

$$\dot{Y}_0 = \dot{F} + \dot{B}_{02} \cdot \Psi_1 + B_{02} \cdot \Psi_2. \quad (11)$$

С раскрытием расщепленных форм, матричное уравнение (7) можно переписать в виде:

$$\dot{Y}_0 = A_0 \cdot Y_0 + B_{01} \cdot \Psi_1 + B_{02} \cdot \Psi_2 + C_0 \cdot U. \quad (12)$$

Подстановка в правую часть уравнения (12) Y_0 из (9), приводит к результату:

$$\dot{Y}_0 = A_0 \cdot [F + B_{02} \cdot \Psi_1] + B_{01} \cdot \Psi_1 + B_{02} \cdot \Psi_2 + C_0 \cdot U. \quad (13)$$

Из сравнения левых частей (11) и (13) следует:

$$\dot{F} + \dot{B}_{02} \cdot \Psi_1 + B_{02} \cdot \Psi_2 = A_0 \cdot [F + B_{02} \cdot \Psi_1] + B_{01} \cdot \Psi_1 + B_{02} \cdot \Psi_2 + C_0 \cdot U$$

что, после соответствующих преобразований и группировки, позволяет записать модифицированное уравнение состояния, не содержащее Ψ_2 , и, следовательно, не требующее дифференцирования параметров форм Ψ_1 :

$$\dot{F} = A_0 \cdot F + [A_0 \cdot B_{02} + B_{01} - \dot{B}_{02}] \cdot \Psi_1 + C_0 \cdot U. \quad (14)$$

Сравнение уравнения (14) для модифицированного пространства состояний F и исходного соотношения (7) для пространства состояний Y_0 позволяет рассматривать коэффициент, стоящий перед матрицей Ψ_1 :

$$B_1 = [A_0 \cdot B_{02} + B_{01} - \dot{B}_{02}] \quad , \quad (15)$$

как матрицу влияния отклонения формы детали и круга для модифицированного состояния. Если, дополнительно, параметры демпфирования зоны контакта, массы заготовки и шлифовального круга в процессе обработки могут быть приняты не зависящими от времени, то элементы матрицы \dot{B}_{02} равны нулю и выражение (15) приобретает форму:

$$B_1 = [A_0 \cdot B_{02} + B_{01}] \cdot$$

Модифицированное матричное дифференциальное уравнение пространства состояния имеет вид:

$$\dot{F} = A_0 \cdot F + B_1 \cdot \Psi_1 + C_0 \cdot U. \quad (16)$$

Как системе дифференциальных уравнений (7), так и системе (16) соответствуют совпадающие с точностью до обозначений Y_0, \dot{Y}_0 и F, \dot{F} системы однородных линейных дифференциальных уравнений $\dot{Y}_0 = A_0 \cdot Y_0$ и $\dot{F} = A_0 \cdot F$. Следовательно, системы (7) и (16) являются эквивалентными в смысле Ляпунова [1].

Оценка состояния X_0 на основе результатов моделирования модифицированной системы (16) может быть восстановлена в состояниях (8) применением к результатам (16) преобразования (12):

$$X_0 = D_0 \cdot F + D_0 \cdot B_{02} \cdot \Psi_1, \quad (17)$$

где матрицы X_0, D_0, B_{02}, Ψ_1 соответствуют матрицам, использованным в (7), а модифицированный вектор состояния F определяется (16).

Выводы. Применение предложенного подхода целесообразно при оценках непосредственно неизмеряемых параметров (например, фактической глубины резания) и позволяет снизить влияние как шумов измерения, так и шумов, связанных в вычислительными процедурами соответствующих оценок. Его необходимо непосредственно использовать при реализациях процедур стохастического наблюдения и фильтрации.

Библиографический список использованной литературы

1. Братан С.М. Моделирование взаимодействия шлифовального круга с заготовкой / С.М. Братан, Ю.К. Новоселов, Д.А. Каинов // Вестник СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. – Севастополь, 2001. – Вып. 30. – С. 12-16.
2. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц / Ф.Р. Гантмахер. – М.: Наука, 1988. – 552 с.

Поступила в редакцию 28.01.2014 г.

Сазонов С.Є. Оцінка безпосередньо невимірюваних параметрів процесу шліфування

Запропоновано методику побудови динамічних співвідношень не потребує диференціювання вимірів відхилень форм для процесу шліфування.

Ключові слова: шліфування, шум спостереження, фільтрація.

Sazonov S.E. Evaluation process parameters directly unmeasured grinding

The construction of dynamic measurements ratio of deviations forms technique not demanding differentiation for grinding process is offered.

Keywords: grinding, noise monitoring, filtering.