

УДК 621.923

Д.Е. Сидоров, доцент, канд. техн. наук,

С.М. Братан, профессор, д-р техн. наук,

А.А. Ярошенко, доцент, д-р физ.-мат. наук

Севастопольский национальный технический университет,

ул. Университетская 33, г. Севастополь, 299053

sidorov-sntu@yandex.ru

РАЗРАБОТКА САУ ТП ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ

Предложена методика синтеза систем автоматического управления технологическим процессом плоского шлифования. Полученные в работе результаты могут быть использованы для синтеза систем управления операциями плоского наружного шлифования и могут служить основой для создания более сложных систем.

Ключевые слова: система автоматического управления, технологический процесс, плоское шлифование.

Введение. В современных условиях порядка 15...20 % финишных операций осуществляется методами плоского наружного шлифования [1]. 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 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 [2]. Вместе с тем, процессы шлифования имеют сложную стохастическую природу, что приводит к разбросу показателей качества изделий и не позволяет использовать все возможности финишных методов [3-4].

Целью данной статьи является создание САУ ТП плоского шлифования с оптимальной диагностикой и регулятором.

Основное содержание работы. Необходимость определения в процессе обработки ряда параметров технологической системы (ТС) в том числе и недоступных непосредственному измерению. К таким параметрам относится, например, фактическая глубина резания. Задача ее оценки может быть решена с использованием теории динамических наблюдателей [5] имеющих структуру, приведенную на рисунке 1.

С течением времени, значения переменных и их оценок наблюдателем неизбежно расходятся вследствие, например, отличий действительных значений отклонений радиус-векторов и их моделей.

Для наилучшего оценивания параметров процесса целесообразно использование блока подстройки состояний (наблюдателя), например, в форме фильтра Калмана-Бьюси цикла программного управления с минимально допустимыми запасами.

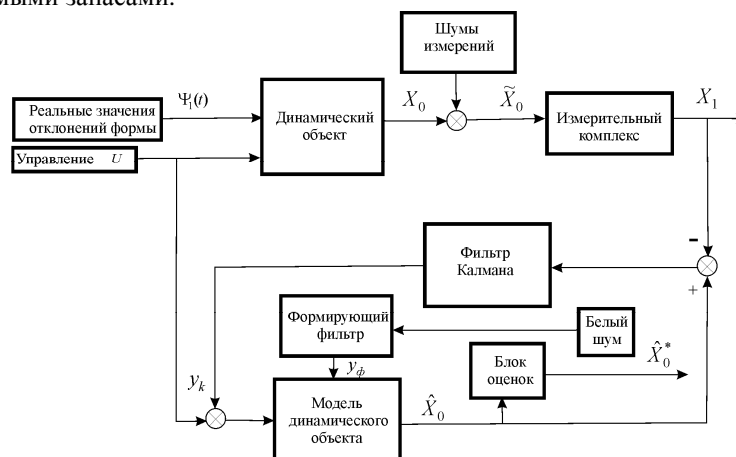


Рисунок 1 – Схема стохастической диагностики

Полученные оценки имеют наименьшую из возможных дисперсию (при условии гауссовских шумов измерений) и пригодны для использования в системах управления по отклонению. Такая система (рис. 2.) должна стабилизировать режимы относительно режимов, задаваемых условиями.

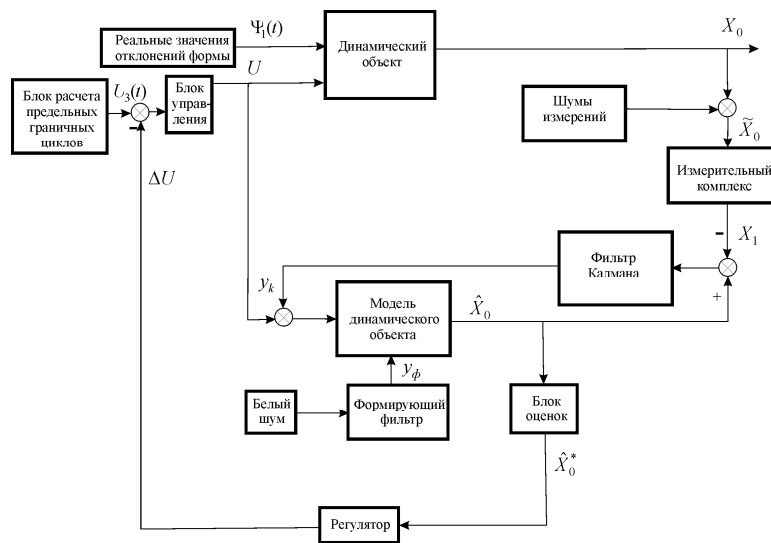


Рисунок 2 – Система управления процессом шлифования

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

Взаимодействующие шлифовальный круг и заготовка в первую очередь характеризуются параметрами формы шлифовального круга и заготовки, их взаимоположением, упругими, демпфирующими и другими свойствами технологической системы [6]. 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.

Для процесса плоского наружного шлифования схема взаимодействия имеет вид, представленный на рисунке 3.

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

Динамику процесса плоского наружного шлифования полнее всего отражает нормальная сила шлифования. В состав такой силы входит ее среднее значение, составляющие, вызванные остаточным дисбалансом шлифовального круга, а также отклонения форм инструмента и заготовки в зоне их взаимодействия.

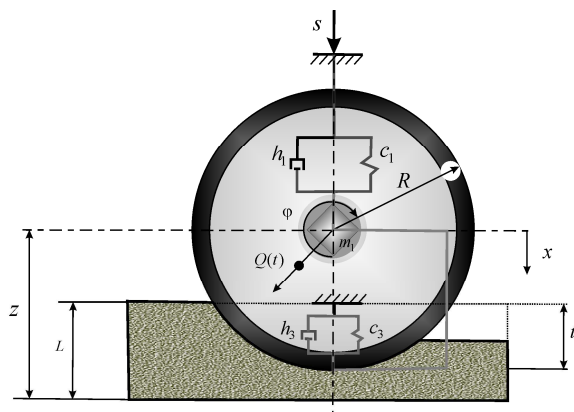


Рисунок 3 – Эквивалентная схема динамической системы плоскошлифовального станка

Величина среднего значения нормальной силы шлифования зависит от средних значений взаимоположения центра шлифовального круга и поверхности заготовки и определяется технологическими режимами и параметрами жесткости c_1 и c_3 обработки. В свою очередь, она определяет среднее значение перемещений упругой системы станка, которое может быть определено и учтено на этапе разработки технологического процесса.

Составляющие, вызванные динамическим проявлением эффектов дисбаланса и отклонениями форм шлифовального круга и заготовки, приводят к соответствующим отклонениям от номинального (спроектированного) технологического режима обработки и, следовательно, к отклонениям в показателях качества обработанной поверхности.

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.

Геометрические размеры круга и детали, а также расстояния между опорами отличаются от расчетных или средних значений. Вариации параметров ΔR и ΔL управления ΔS изменяются с течением времени и могут рассматриваться как причины вызывающие перемещение звеньев системы, а вариации положения (координат) звеньев $\Delta x_1, \Delta x_2$ – как реакции на эти возбуждения.

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), а 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. $\delta = x_0 + \Delta x$, с учетом подстановки $\Delta x = 0$, $\Delta L = 0$, $\Delta R = 0$, $\Delta s = 0$ в зависимость (2), получено следующее:

$$m_1 \ddot{x}_0 + h_1 \dot{x}_0 + c_1 x_0 = h_3 (\dot{L}_0 + \dot{R}_0 - \dot{x}_0) + c_3 (L_0 + R_0 - x_0) - c_1 s_0 - h_1 \dot{s}_0 \quad (3)$$

Записывая разность выражений (2) от (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 Δ , запишем уравнение, характеризующее процесс шлифования в виде:

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

Вследствие вращения круга вариации геометрических размеров имеют периодический или почти периодический характер, что и объясняет появление внутренних возбуждающих сил, в существенной степени определяющих динамику процесса шлифования. Модель (5) служит основой для анализа динамики отклонения процесса взаимодействия шлифовального круга с заготовкой от номинального режима.

Учитывая, что выражение (5), является дифференциальным уравнением второго порядка, обозначим $x = u_1$ и используем для понижения порядка (5) стандартную процедуру. Получим два дифференциальных уравнения первого порядка:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= y_2, \\ \dot{y}_2 &= -y_2 \frac{(h_1 + h_3)}{m_1} - y_1 \frac{(c_1 + c_3)}{m_1} + \frac{h_3 \dot{L}}{m_1} + \frac{c_3 \dot{L}}{m_1} + \frac{h_3 \dot{R}}{m_1} + \frac{c_3 \dot{R}}{m_1} - \frac{h_1 \dot{s}}{m_1} - \frac{c_1 \dot{s}}{m_1} + \frac{F(t)}{m_1}, \end{aligned}$$

которые в векторно-матричном виде запишутся:

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

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 заданных 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 заготовки 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

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

$$z_1 = D_1 G_1 + E_1 v_1, \quad (8)$$

где $\Psi = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix}$, $F_{\Psi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{T_2}{T_1^2} \end{bmatrix}$, $G_{\Psi} = \begin{bmatrix} KT_3 \\ -1 - KT_2 T_3 \end{bmatrix}$, $D_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T$, $E_1 = \rho$, Ω_{Ψ} , v_1 –

некоррелированные единичные порождающие гауссовские белые шумы, $T_1 = \frac{1}{v_{11}^2(\alpha^2 + \beta^2)}$,

$$T_2 = \frac{2\alpha}{v_{11}(\alpha^2 + \beta^2)}, \quad T_3 = \frac{1}{v_{11}(\alpha^2 + \beta^2)}, \quad K_1 = \sqrt{2} \sqrt{\frac{D_1 \alpha}{v_{11}(\alpha^2 + \beta^2)}}, \quad D_1 - \text{дисперсия высот неровностей рельефа}$$

шлифовального круга, v_{11} – скорость его движения, α, β – соответствующие коэффициенты корреляции;

– для заготовки:

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

$$z_2 = D_2 G_2 + E_2 v_2, \quad (10)$$

где $\Phi = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix}$, $F_{\Phi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_4^2} & -\frac{T_5}{T_4^2} \end{bmatrix}$, $G_{\Phi} = \begin{bmatrix} KT_6 \\ -1 - KT_5 T_6 \end{bmatrix}$, $D_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T$, $E_2 = \rho_2$, Ω_{Φ} , v_2 – некоррелированные

единичные порождающие гауссовские белые шумы, $T_4 = \frac{1}{v_{22}^2(\alpha_2^2 + \beta_2^2)}$, $T_5 = \frac{2\alpha_2}{v_{22}(\alpha_2^2 + \beta_2^2)}$,

$$T_6 = \frac{1}{v_{22}(\alpha_2^2 + \beta_2^2)}, \quad K_2 = \sqrt{2} \sqrt{\frac{D_2 \alpha_2}{v_{22}(\alpha_2^2 + \beta_2^2)}}, \quad D_2 - \text{дисперсия высот неровностей рельефа заготовки,}$$

v_{22} – скорость ее движения, α_2, β_2 – соответствующие коэффициенты корреляции.

На основании уравнения (6) с учетом (9-10) получим расширенную систему:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{\psi}_1 \\ \dot{\psi}_2 \\ \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(c_1+c_3) & -(h_1+h_3) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_1 & m_1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{h_3}{m_1} \frac{1}{T_1^2} & -\frac{c_3}{m_1} \frac{T_2}{T_1^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{h_3}{m_1} \frac{1}{T_4^2} & -\frac{c_3}{m_1} \frac{T_5}{T_4^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \\ \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_1 T_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 - K_1 T_2 T_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_2 T_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 - K_2 T_5 T_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ P_m \\ 0 \\ \omega_\psi \\ 0 \\ \omega_\phi \end{bmatrix} \quad (11)$$

или в виде блочных матриц:

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

где

$$F(t) = \begin{bmatrix} F_0 & 0 & 0 \\ 0 & F_\psi & 0 \\ 0 & 0 & F_\phi \end{bmatrix}, X(t) = \begin{bmatrix} Y \\ \Psi \\ \Phi \end{bmatrix}, \dot{X}(t) = \begin{bmatrix} \dot{Y} \\ \dot{\Psi} \\ \dot{\Phi} \end{bmatrix}, G(t) = \begin{bmatrix} G_0 & 0 & 0 \\ 0 & G_\psi & 0 \\ 0 & 0 & G_\phi \end{bmatrix}, W(t) = \begin{bmatrix} P_0 \\ \Omega_\psi \\ \Omega_\phi \end{bmatrix}, H(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$\varepsilon \approx 0$ при допустимых величинах дисбаланса.

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.

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

Предположим, что алгоритм фильтрации задается линейным дифференциальным уравнением

$$\dot{\hat{x}}(t) = A(t)\hat{x}(t) + B(t)z(t), \quad (14)$$

где $\hat{x}(t)$ оценка состояния $x(t)$.

Для того чтобы оценить значения фактической глубины резания наилучшим образом необходимо найти такие матрицы $A(t)$ и $B(t)$, чтобы оценка $\hat{x}(t)$ была несмещенной и имела минимальную дисперсию ошибки.

Для этого возьмем производную по времени от уравнения ошибки оценивания:

$$\dot{\tilde{x}}(t) = F(t)x(t) + G(t)w(t) - \left[A(t)\hat{x}(t) + B(t)z(t) \right].$$

Если подставить модель наблюдений $z(t)$ из уравнения (13), получим

$$\dot{\tilde{x}}(t) = F(t)x(t) + G(t)w(t) - A(t)\hat{x}(t) - B(t)H(t)x(t) - B(t)v(t). \quad (15)$$

Учитывая, что $\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ можно записать уравнение (15) как

$$\dot{\tilde{x}}(t) = [F(t) - A(t) - B(t)H(t)] \cdot x(t) + A(t)\tilde{x}(t) + G(t)w(t) - B(t)v(t). \quad (16)$$

Для условно несмещенной оценки состояния $x(t)$ при всех $t > 0$, условное среднее как $\tilde{x}(t)$, так и $\hat{x}(t)$ (при фиксированном $Z(t)$), должно быть равно нулю.

Вычислим условное среднее обеих частей уравнения (15) (при фиксированном $Z(t)$) с учетом центрированности шумов $w(t), v(t)$ получим

$$0 = [F(t) - A(t) - B(t)H(t)]E\{x(t) | Z(t)\}, \tag{17}$$

здесь $E\{x(t) | Z(t)\}$ могут оказаться не равными нулю для всех t , поэтому условие (17), может соблюдаться только если

$$F(t) - A(t) - B(t)H(t) = 0 \text{ для всех } t \geq 0. \tag{18}$$

Тогда уравнение (14) принимает вид

$$\dot{\hat{x}}(t) = [F(t) - B(t)H(t)] \hat{x}(t) + B(t)z(t).$$

Этот результат может быть представлен в форме, сходной с уравнением фильтра Калмана:

$$\dot{\hat{x}}(t) = F(t)\hat{x}(t) + B(t) \left[z(t) - H \hat{x}(t) \right]. \tag{19}$$

Следовательно, удовлетворение требования условной несмещенности оценки приводит к структуре фильтра, аналогичного фильтру Калмана. Тогда минимально достижимая дисперсия оценок состояния системы (13) может быть оценена матричным уравнением типа Риккати [5]:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{P}} = & \begin{bmatrix} F_0 & 0 & 0 \\ 0 & F_\psi & 0 \\ 0 & 0 & F_\phi \end{bmatrix} \cdot \tilde{P} + \tilde{P} \cdot \begin{bmatrix} F_0 & 0 & 0 \\ 0 & F_\psi & 0 \\ 0 & 0 & F_\phi \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} G_0 & 0 & 0 \\ 0 & G_\psi & 0 \\ 0 & 0 & G_\phi \end{bmatrix} \hat{\Omega}_\psi \times \\ & \times \begin{bmatrix} G_0 & 0 & 0 \\ 0 & G_\psi & 0 \\ 0 & 0 & G_\phi \end{bmatrix}^T - \tilde{P} \cdot \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}^T \cdot \check{\Omega}_\phi^{-1} \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \cdot \tilde{P}, \end{aligned} \tag{20}$$

которое решается до начала процесса обработки конкретной детали, вследствие того, что в нем отсутствуют результаты наблюдений за динамической системой.

Матрица коэффициентов усиления фильтра Калмана определяются следующей системой уравнений [10].

Так как $w(t), v(t)$ – являются по [7] независимыми белыми шумами с интенсивностями $\hat{\Omega}_\psi$ и $\check{\Omega}_\phi$, соответственно, то управление является несмещенным и оптимальным для стохастической постановки [9], поэтому для алгоритма управления справедлива следующая структура

$$\begin{aligned} B(t) = & \begin{bmatrix} F_0 & 0 & 0 \\ 0 & F_\psi & 0 \\ 0 & 0 & F_\phi \end{bmatrix} \cdot \tilde{P} + \tilde{P} \cdot \begin{bmatrix} F_0 & 0 & 0 \\ 0 & F_\psi & 0 \\ 0 & 0 & F_\phi \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} G_0 & 0 & 0 \\ 0 & G_\psi & 0 \\ 0 & 0 & G_\phi \end{bmatrix} \hat{\Omega}_\psi \times \\ & \times \begin{bmatrix} G_0 & 0 & 0 \\ 0 & G_\psi & 0 \\ 0 & 0 & G_\phi \end{bmatrix}^T - \tilde{P} \cdot \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}^T \cdot \check{\Omega}_\phi^{-1} \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \cdot \tilde{P} \cdot \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}^T \cdot \check{\Omega}_\phi^{-1} \end{aligned} \tag{21}$$

или

$$B(t) = \tilde{P}(t) \cdot H^T(t) \cdot \check{\Omega}_\phi(t)^{-1}. \tag{22}$$

С учетом (20), (21), (22) алгоритм фильтрации наблюдений определяется матричными уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{\hat{X}} &= F \cdot \hat{X} + G \cdot W + B \cdot [Z - H \cdot \hat{X}], \\ \dot{\hat{t}}_f &= [-1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0] \cdot \hat{X}. \end{aligned} \tag{23}$$

Соотношения (23) 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 возмущений.

Для синтеза оптимального детерминированного регулятора необходимо наличие критерия оптимальности. Таким критерием для линейных систем с гауссовскими возмущениями типа белого шума может выступать функционал вида [10]

$$I = M \left[\frac{1}{2} x^T(t) Q_1 x(t) + \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \left(x^T Q_2 x + u^T Q_3^{-1} u \right) dt \right], \quad (24)$$

где Q_1, Q_2, Q_3 – соответствующие весовые матрицы качества управления. Управление является несмещенным и оптимальным для стохастической постановки [9-10], поэтому для алгоритма управления справедлива следующая структура

$$u^*(t) = -B_1 \hat{x}(t), \quad (25)$$

где $B_1 = Q_3^{-1} G^T \tilde{P}_1$, а матрица \tilde{P}_1 удовлетворяет уравнению

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{P}}_1 = -\tilde{P}_1 \cdot \begin{bmatrix} F_0 & 0 & 0 \\ 0 & F_\psi & 0 \\ 0 & 0 & F_\phi \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_0 & 0 & 0 \\ 0 & F_\psi & 0 \\ 0 & 0 & F_\phi \end{bmatrix}^T \tilde{P}_1 + \tilde{P}_1 \cdot \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \times \\ \times Q_3^{-1} \cdot \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \tilde{P}_1 - Q_3, \quad \tilde{P}_1(0) = \tilde{P}_{10}. \end{aligned}$$

В соответствии с (23), (21) и (25) модель системы с регулятором приобретает вид:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\hat{Y}} \\ \dot{\hat{\Psi}} \\ \dot{\hat{\Phi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0 & 0 & 0 \\ 0 & F_\psi & 0 \\ 0 & 0 & F_\phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{Y} \\ \hat{\Psi} \\ \hat{\Phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot Q_3^{-1} \begin{bmatrix} G_0 & 0 & 0 \\ 0 & G_\psi & 0 \\ 0 & 0 & G_\phi \end{bmatrix}^T P_1 \cdot \begin{bmatrix} \hat{Y} \\ \hat{\Psi} \\ \hat{\Phi} \end{bmatrix} + \\ + P \cdot \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}^T \cdot \Omega^{-1} \times \left[z(t) - \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{Y} \\ \hat{\Psi} \\ \hat{\Phi} \end{bmatrix} \right], \quad \hat{X}(0) = \bar{X}(0). \end{aligned} \quad (26)$$

В силу того, что начальное состояние $X(0)$ некоррелировано с $w(t)$, $v(t)$ и распределено по нормальному закону с математическим ожиданием $M(X_0) = \hat{X}_0$ и ковариацией $M \left[\left(X - \hat{X}_0 \right) \left(X - \hat{X}_0 \right)^T \right] = P_{10}$.

На основании (13), (23) и (26), замкнутый контур регулирования, состоящий из объекта, фильтра и регулятора, для технологической системы плоского шлифования, характеризуется обобщенной системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{X}} \\ \dot{\hat{X}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F & -CB_1 \\ BH & F - CB_1 - BH \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ \hat{X} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G \\ 0 \end{bmatrix} \times W + \begin{bmatrix} 0 \\ B \cdot \Omega \end{bmatrix} \times v.$$

Выводы.

Полученные результаты могут быть использованы для синтеза систем управления операциями плоского наружного шлифования и могут служить основой для создания более сложных систем, что представляют собой перспективы дальнейших исследований в данной области.

Перспективы дальнейших исследований в данной области. Предложенная САУ ТП синтезирована для условий превалирующего действия возмущений вызванных отклонениями формы шлифовального круга. В случае появления существенных возмущений иной природы, необходимо

построение новых формирующих фильтров, что определяет область дальнейших исследований в области синтеза оптимальных САУ ТП.

Библиографический список использованной литературы

1. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Изд-во Сарат. ун-та, 1979. – 232 с.
2. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с
3. 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.
4. 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.
5. Братан С.М. Технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительного чистового и тонкого шлифования: дис. ... доктора техн. наук: 05.02.08: защищена 24.03.2006; утв. 01.07. 2006 / Братан Сергей Михайлович. – Одесса, 2006. – 321 с.
6. 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.
7. Братан С.М. Управление операцией плоского шлифования с динамической стабилизацией параметров технологического цикла // Резание и инструмент в технологических системах: межд. науч.-техн. сборник. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. 57. – С.17-23

Поступила в редакцию 15.01.2014 г.

Сідоров Д.Є., Братан С.М., Ярошенко О.О. Розробка САК ТП плоского шліфування

Запропоновано методику синтезу систем автоматичного керування технологічним процесом плоского шліфування. Отримані в роботі результати можуть бути використані для синтезу систем управління операціями плоского зовнішнього шліфування і можуть служити основою для створення більш складних систем.

Ключові слова: система автоматичного керування, технологічний процес, плоске шліфування.

Sidorov D., Bratan S., Yaroshenko A. Development of automatic control system of technological process flat grinding

The technique of synthesis of automatic control systems of technological process flat grinding. The obtained results can be used for synthesis of control systems flat outer grinding and can serve as a basis for creating more complex systems.

Keywords: automatic control system, technological process, grinding surfaces.