

## АНАЛІЗ ДВОКООРДИНАТНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ

**Єнікєєв О.Ф., Суботін О.В., Фроленко А.П.**

Українська державна академія залізничного транспорту, Краснолиманська філія.  
Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ,  
факультет автоматизації машинобудування.

**Abstract**

*Enikeyev A.F., Subbotin O.V., Frolenko A.P. The analysis of two-coordinate model of technological process of diamond grinding. On the basis of methods of the theory of automatic control the generalized mathematical model of technological process of diamond grinding is developed and analyzed. Structural modeling a control system by process of diamond grinding is carried out.*

Техніко-економічні показники технологічного процесу алмазного шліфування можна підвищити шляхом використання у контурі програмного управління верстатом систем автоматизації.

Питанням розробки вказаних систем надається увага в технічній літературі [1–3]. Актуальність цієї науково-технічної проблеми зумовлена тим, що вона не вирішена у повному обсязі.

Ціллю роботи є розробка узагальненої математичної моделі технологічного процесу алмазного шліфування та її аналіз.

У основу розробки системи автоматизації технологічного процесу алмазного шліфування авторами покладено принцип управління по відхиленню. Узагальнена структурна схема цієї системи представлена на рис. 1. На цьому рисунку вказано:  $U^n = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$  — вектор управління виконавчими механізмами верстату;  $X^m = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$  — вектор стану вхідної сировини та технологічних характеристик вихідного продукту;  $Y^k = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}$  — вектор властивостей вихідного продукту й поточних технологічних параметрів шліфувального верстату;  $\zeta^i = \{\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_i\}$  — вектор випадкових збурень в технологічній системі.

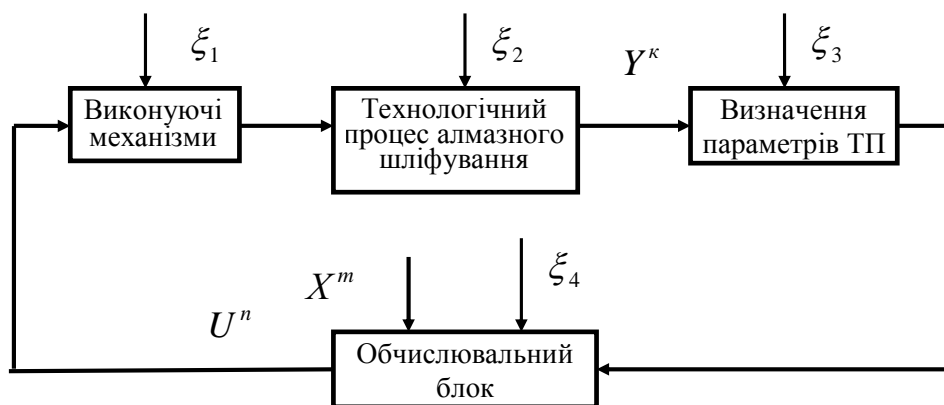


Рисунок 1 — Узагальнена схема управління технологічним процесом алмазного шліфування

Потрібно синтезувати багатомірний вектор управління  $U^n$ , який забезпечить отримання вектора  $Y^k$  допомогою шліфувального станка з вектора  $X^m$  при наявності в контурі управління об'єктом випадкових збурюючих впливів  $\zeta^i$ . Оцінки багатомірних векторів  $X^m$  та  $Y^k$  система автоматизації отримує шляхом безпосередніх вимірювань окремих технологічних параметрів станка. Метрологічні характеристики вузла оцінювання поточних параметрів технологічного процесу алмазного шліфування та виконавчих механізмів, а так само помилки округлення обчислювального блоку дозволяють сформуванню багатомірний вектор випадкових збурень  $\zeta^i$  в системі автоматизації. Багатомір-

ний вектор впливів  $U^n$  обчислювального блоку на виконавчі механізми станка отримаємо з аналізу математичної моделі об'єкта автоматизації.

Узагальнену математичну модель процесу алмазного шліфування розробимо на прикладі верстата моделі 3В624.

Конструктивні особливості цього верстату дозволяють використати системою у якості регулюючих впливів поперечну  $S_{non}$  й подовжню  $S_{np}$  подачі алмазного інструмента. Отже, система автоматизації повинна сформувати два сигнали управління шліфувальним верстатом по незалежним координатам. За вихідну величину детермінованої математичної моделі в роботі прийнято силу різання  $F$  матеріалу заготівлі. Математична модель об'єкта автоматизації буде побудована для кожної незалежної координати управління шліфувальним верстатом.

При складанні математичної моделі об'єкта автоматизації по координаті  $S_{non}$  враховані наступні технологічні параметри верстату: динаміка процесу різання матеріалу заготівлі, пружні деформації, знос шліфувального круга. За вихідну величину математичної моделі об'єкта по цій координаті управління верстатом приймемо радіальну складову сили різання  $F_y$  матеріалу заготівлі.

З урахуванням результатів роботи [4] маємо

$$H_1(p) = \frac{K_{рез,y}(1 - e^{-pt_1})}{1 + K_{рез,y}(1 - e^{-pt_1}) \left[ pK_y \left( \frac{p^2}{\Omega_m^2} + \frac{2\beta_m p}{\Omega_m} + 1 \right) + \frac{K_{ук}}{p\tau_{кр}} (1 - e^{-p\tau_{кр}}) \right]} \quad (1)$$

Вираз (1) досліджено за допомогою пакету *Matlab*. З урахуванням логарифмічних амплітудно та фазочастотних характеристик частотний спектр радіальної складової сили різання виходить в такому вигляді

$$F_y(\Omega) = L_2(\Omega) e^{j\varphi_2(\Omega)} S_{non}(\Omega) \quad (2)$$

У цьому виразі невідомо дискретний частотний спектр вхідної величини. При його отриманні врахуємо наступне: під час прямого та зворотного ходу шліфувального круга фаза вихідної величини змінюється на  $180^\circ$ ; прямий й зворотний хід утворюють період основної гармоніки частотного представлення вхідної величини. З урахуванням цього найбільш повно специфіці поставленої задачі відповідає такий сигнал

$$S_{non}(t) = \begin{cases} 0 & n\pi - \pi < \Omega t < -\pi + \alpha, -\alpha < \Omega t < \alpha, \pi - \alpha < \Omega t < \pi, \\ S_{non} n\pi & \alpha < \Omega t < \pi - \alpha, \\ -S_{non} n\pi & -\pi + \alpha < \Omega t < -\alpha, \alpha > 0, 0 < \alpha < 0.5\pi; \end{cases} \quad (3)$$

де  $\alpha = \frac{\Omega}{2}(t_1 - t_2)$ ,  $t_2$  — час взаємодії шліфувального круга з поверхнею деталі, що оброблюється.

Розкладання сигналу (3) в ряд Фур'є має наступний вигляд

$$S_{non}(\Omega) = \frac{4S_{non}}{\pi} \left[ \cos \frac{\Omega}{2}(t_1 - t_2) \sin \Omega t + \frac{1}{3} \cos \frac{3\Omega}{2}(t_1 - t_2) \sin 3\Omega t + \frac{1}{5} \cos \frac{5\Omega}{2}(t_1 - t_2) \sin 5\Omega t + \dots \right] \quad (4)$$

При складанні математичної моделі об'єкта автоматизації по координаті  $S_{np}$  враховувалися наступні технологічні параметри верстату: динаміка процесу різання матеріалу заготівлі, знос шліфувального круга. Внаслідок аналізу моделі отримано наступний вираз для передавальної функції

$$H_2(p) = \frac{K_{рез,x}(1 - e^{-pt_1})}{1 + \frac{K_x K_{рез,x}}{p}(1 - e^{-pt_1})} \quad (5)$$

З урахуванням логарифмічних амплітудних та фазочастотних характеристик частотний спектр тангенціальної складової сили різання виходить в наступному вигляді

$$F_x(\Omega) = L_3(\Omega) e^{j\varphi_3(\Omega)} S_{np}(\Omega). \quad (6)$$

Процедура підсумовування побудованих математичних моделей технологічного процесу алмазного шліфування виконана з урахуванням ортогональності координат управління шліфувальним верстатом. Енергія сигналу сили різання матеріалу заготівлі дорівнює сумі енергій радіальної та тангенціальної складових:  $W = W_x + W_y$ . Звідси після нескладних математичних перетворень маємо таке рівняння:  $F^2(t) = F_x^2(t) + F_y^2(t)$ , тобто, сила різання матеріалу заготівлі рівна геометричній сумі радіальної і тангенціальної складових.

Внаслідок лінійності перетворення Лапласа і з урахуванням теореми складання маємо операторне рівняння, яке досить легко реалізується стандартними засобами пакету *Matlab*

$$F(p) = \sqrt{F_x^2(p) + F_y^2(p)} = \sqrt{H_2^2(p) S_{non}^2(p) + H_3^2(p) S_{np}^2(p)}. \quad (7)$$

Сила різання матеріалу заготівлі створює на валу шліфувального круга збурюючий момент

$$M_e(t) = R_{kp} F(t). \quad (8)$$

Цей збурюючий момент є джерелом крутильних коливань, які виникають у валопроводі шліфувального круга.

Вал зі встановленим на ньому шліфувальним кругом в роботі представлено механічною системою з одним ступенем свободи. Рухи мас такої детермінованої системи описуються диференціальним рівнянням

$$J_{kp} \varphi''(t) + \beta_1 \varphi'(t) + \gamma_1 \varphi(t) = M_e(t), \quad (9)$$

де  $J_{kp}$  — момент інерції круга,  $\beta_1$  — коефіцієнт демпфування,  $\gamma_1$  — крутильна жорсткість вала,  $\varphi(t)$  — кут закрутки вала.

Миттєва швидкість обертання шліфувального круга є похідна від кута закрутки вала. З урахуванням цього й після нескладних математичних перетворень рівняння (9) приводиться до такого вигляду

$$J_{kp} \Delta \omega'(t) + \beta_1 \Delta \omega(t) + \frac{\gamma_1}{t_1} \int_0^{t_1} \Delta \omega(t) dt = R_{kp} F(t).$$

Перейшовши від часових реалізацій девіацій швидкості обертання шліфувального круга до перетворення по Лапласу цього сигналу при нульових початкових умовах, отримуємо таке операторне рівняння

$$J_{kp} \Delta \omega(p) + \beta_1 \Delta \omega(p) + \frac{\gamma_1}{pt_1} \Delta \omega(p) = R_{kp} F(p).$$

Звідси отримуємо передавальну функцію, яка пов'язує нерівномірність обертання шліфувального круга з силою різання матеріалу заготівлі

$$H_3(p) = \frac{R_{kp} t_1 p}{\frac{J_{kp} t_1}{\gamma_1} p^2 + \frac{\beta_1 t_1}{\gamma_1} p + 1}. \quad (10)$$

З урахуванням логарифмічних амплітудно та фазочастотних характеристик частотний спектр девіацій швидкості обертання шліфувального круга по спектру сили різання  $F(\Omega)$  оцінюється за допомогою виразу

$$\Delta \omega(\Omega) = L_4(\Omega) e^{j\varphi_4(\Omega)} F(\Omega). \quad (11)$$

Узагальнена математична модель технологічного процесу алмазного шліфування побудована по операторним рівнянням (1), (5), (7) та (10), а структурна схема цієї моделі представлена на рис. 2.

В результаті структурного моделювання технологічного процесу алмазного шліфування у середовищі *Matlab* отримано графік зміни вихідної величини системи, який представлено на рис. 3.

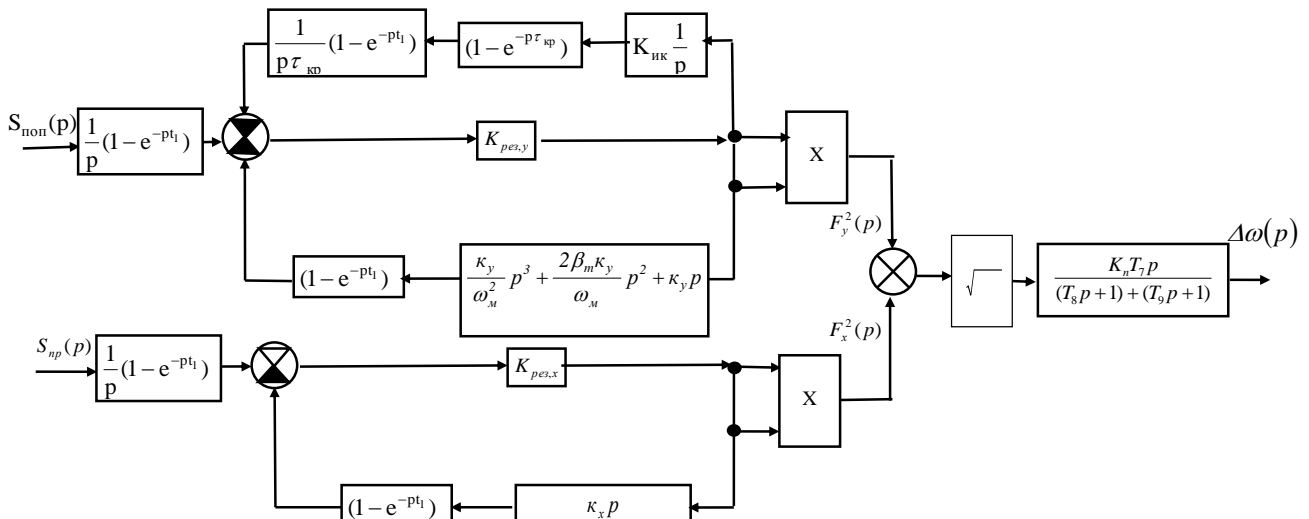


Рисунок 2 — Структурна схема математичної моделі

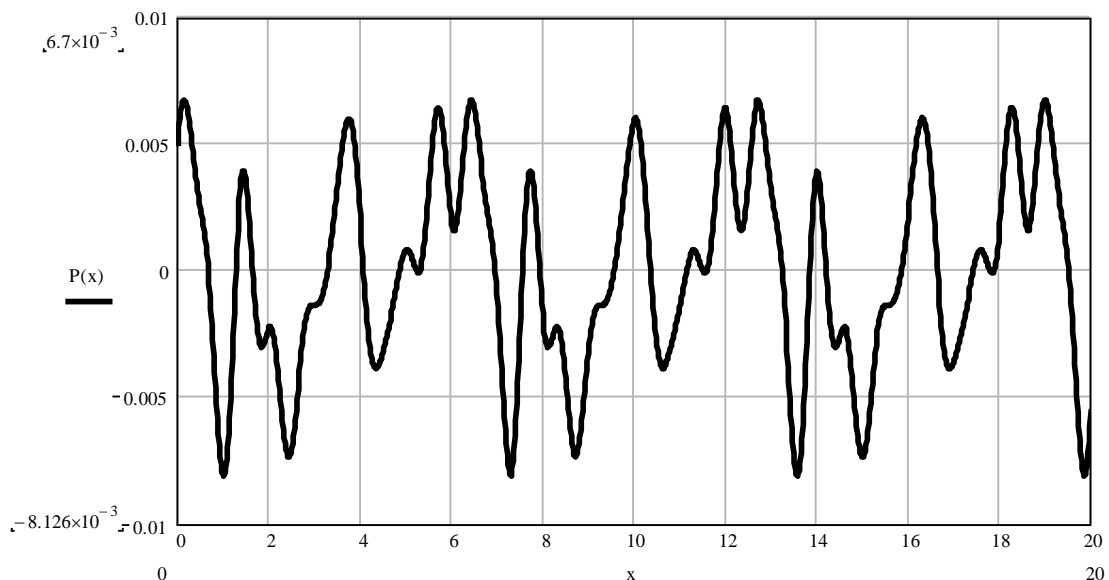


Рисунок 3 — Часова реалізація вихідної величини

**Висновки**

1. Розроблена узагальнена математична модель технологічного процесу алмазного шліфування, приведено її аналіз.
2. Структурне моделювання системи управління процесом алмазного шліфування за допомогою пакета *Matlab* та дослідження вихідного параметра системи доводять працездатність та стійкість системи.

**Література**

1. Матюха П.Г. Алмазное шлифование с управлением параметрами рабочей поверхности круга // Резание и инструмент. — Донецк: ДонГТУ, Вып. 48. — 1993. — С. 33–35.
2. Полтавец В.В. Себестоимость шлифования с управляющими воздействиями на РПК // Резание и инструмент. — Донецк: ДонГТУ, 1999. — С. 53–60.
3. Новоселов Ю.К., Братан С.М., Крылов И.В. Стратегия управления операцией шлифования в автоматизированном производстве // Резание и инструмент. — Донецк: ДонГТУ, 2001. — С. 25–31.
4. Еникеев А.Ф. Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования. — Краматорск: ДГМА, 2001. — 160 с.