УДК 681.518.3

О.Ф. ЄНІКЄЄВ, канд. техн. наук, доц., УкрДАЗТ, Харків;
Ф.М. ЄВСЮКОВА, ст. преп., НТУ «ХПІ», Харків;
Л.О. ШИШЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ», Харків.

СИСТЕМА ПОКООРДИНАТНОГО УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ В УМОВАХ НЕПОВНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Запропоновано нову концепцію та на її основі побудовано багаторівневу цифрову система покоординатного управління подачами шліфувального круга та швидкістю обертання алмазного інструменту, яка забезпечує якість обробленої поверхні деталі на рівні 11 квалітету точності.

The new concept is offered and on its basis the multilevel digital control system of supplies of a grinding circle on co-ordinates and a rotational speed of the diamond tool which provides quality of the processed surface of a detail at level of 11 degree of accuracy of machining is built.

Предложена новая концепция и на ее основе построена многоуровневая цифровая система покоординатного управления подачами шлифовального круга и частотой вращения алмазного инструмента, которая обеспечивает качество обработанной поверхности детали на уровне 11 квалитета точности.

Ключевые слова: передаточная функция, математическая модель, принципы покоординатного и непосредственно цифрового управления.

Вступ. Впровадження до машинобудівного виробництва України сучасних інформаційних й енергозберігаючих технологій базується на розробці технічних засобів автоматизації технологічних процесів й, зокрема, алмазного шліфування. Програмні рухи відомих систем передбачають у якості мети управління процесами алмазного шліфування підвищення їхньої економічної ефективності за рахунок скорочення тривалості технологічного циклу обробки деталі. При цьому отримання заданої якості обробленої поверхні деталі, яка встановлюється виробничим завданням у вигляді відповідного квалітету чистоти та вноситься до банку даних системи, виключає можливість браку і дає підприємству економію електричної енергії.

Нова концепція управління якістю обробленої поверхні деталі. Побудова замкнених систем зі зворотнім зв’язком по стану поточної якості обробленої поверхні деталі неможлива у зв’язку з відсутністю відповідних первинних перетворювачів. Авторами пропонується ідея використання девіацій швидкості обертання шліфувального круга в якості вхідного сигналу для отримання системою кількісної оцінки поточної шорсткості обробленої поверхні деталі [1]. Цю інформацію система отримає шляхом прямих вимірювань миттєвої швидкості обертання шліфувального круга з подальшим виділенням з її часової реалізації сигналу девіацій. Еталонні рівні амплітуд девіацій встановлено на основі заданих квалітетів чистоти обробленої поверхні деталі та внесено до банку даних системи у вигляді

нормативів. При цьому девіації швидкості обертання шліфувального круга є джерелом непрямої інформації про фактичну амплітуду мікронерівностей поверхні деталі, що оброблюється, та сигналом зворотного зв'язку, який містить в собі інформацію про відхилення прогнозованого квалітету чистоти від його встановленого значення програмою обробки партії деталей. Практичне втілення цієї ідеї дозволило побудувати замкнену систему управління якістю обробленої поверхні деталі без посередніх вимірювань поточних значень її мікронерівностей та зробило можливим застосування принципу управління зі зворотнім зв'язком за станом. У якості програмних рухів системи по досягненню поставленої мети використовується поперечна та повздовжня подачі круга, а також швидкість обертання алмазного інструменту у вигляді управляючих впливів на шліфувальний верстат. На основі принципів покоординатного та безпосереднього цифрового управління розроблено нову концепцію управління якістю обробленої поверхні деталі в умовах неповної інформації та з урахуванням дії на систему випадкових завад (рис. 1).

Рис. 1 – Структурна схема управління алмазним шліфуванням в умовах неповної інформації про поточну якість обробленої поверхні деталі

На цьому рисунку вказано наступні умовні позначки: $\Delta\omega$ – девіації швидкості обертання шліфувального круга, $\overline{U} = (u_1, u_2, \ldots, u_i)^T$ – вектор покоординатного управління верстатом, $\overline{X} = (S_{поп}, S_{пр},\ f_{кр})^T$ – вектор стану технологічного процесу алмазного шліфування, R_Z – амплітуда поточних мікронерівностей, $\overline{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \ldots, \xi_k)^T$ – вектор випадкових завад, $\overline{Q} = (\Delta_{эт}, S_{поп,опт}, S_{пр,опт},\ f_{кр,опт})^T$ – вектор корегуючих уставок.

Критерій вибору оптимального періоду дискретизації за часом управляючого впливу отримано на базі заданого значення похибки. При цьому сам управляючий вплив на шліфувальний верстат подано у такому вигляді

$$v(t)=\sum_{i=1}^{n} A_{2i-1}\sin\left[(2i-1)\omega t\right]. \qquad (1)$$

Втрати інформації при дискретизації за часом гармонійного сигналу оцінюються величиною динамічної похибки, яка отримана у вигляді

$$\delta_{дин}=1-\frac{\pi}{m}\sum_{k=0}^{0.5m-1}\sin\left(k\frac{2\pi}{m}\right). \qquad (2)$$

де m – кількість інтервалів дискретизації.

Відносна похибка дискретизації сигналу (1) визначена з урахуванням внесків гармонійних складових

$$\delta_{сум}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{A_{2i-1}^2}{\sum_{i=1}^{n}A_{2i-1}^2}\delta_{(2i-1)дин}^2}\,. \qquad (3)$$

За допомогою цього виразу побудовано графік (рис. 2), який використано авторами для визначення оптимального періоду дискретизації управляючого впливу на шліфувальний верстат. Швидкодія замкнених каналів системи повинна перевищувати це значення періоду дискретизації.

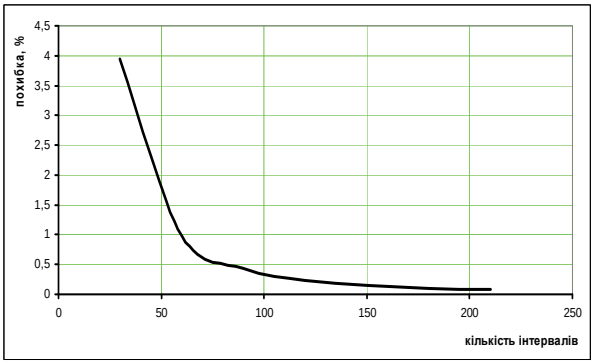

Рис. 2 – Визначення оптимального періоду дискретизації

В основу розробки системи покоординатного управління шліфувальними верстатами також покладено принцип багаторівневого управління на базі мікроконтролерів (рис. 3). Перший рівень системи утворюють замкнені канали управління подачами та швидкістю обертання шліфувального круга. Вони реалізують принцип управління за відхиленням поточних значень вказаних технологічних параметрів від встановлених банком даних для заданого квалітету частоти. Управляючі впливи на верстат

формуються цими каналами під час прямого та зворотного ходу алмазного інструменту. Технічну реалізацію каналів проведено на основі встановлених вище вимог по швидкодії перетворення, а також з урахуванням особливостей шліфувальних верстатів як об'єктів управління:

- підтримка стабільної середньої швидкість обертання шліфувального круга. Встановлено, що сигнал девіацій є результатом дії сили різання матеріалу заготівлі і використовується системою для непрямого оцінювання поточної шорсткості обробленої поверхні деталі;
- управляючі впливи на шліфувальні верстати формуються цифровими регуляторами 1 і 2 з урахуванням корегуючих уставок.

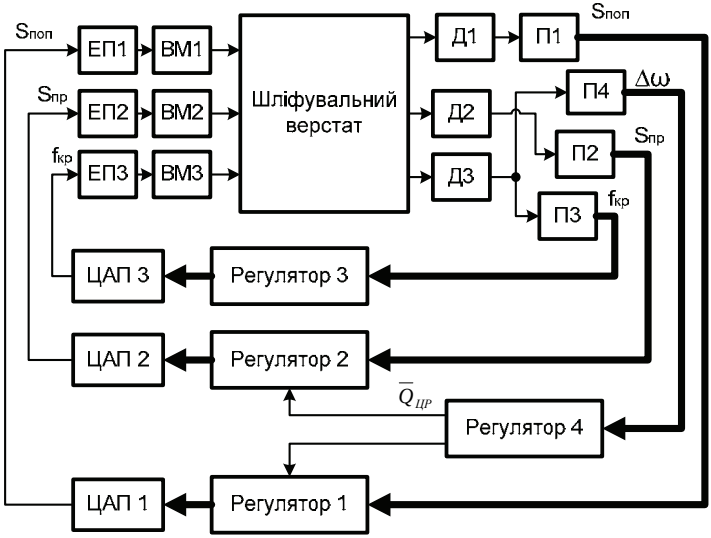

Рис. 3 – Структурна схема системи покоординатного управління шліфувальними верстатами

Другий рівень системи реалізує принцип управління зі зворотнім зв'язком по стану поточної шорсткості обробленої поверхні деталі. В основу його розробки покладено принцип допускового контролю. Цифровий регулятор 4 на основі вимірювань миттєвої швидкості обертання шліфувального круга та за допомогою інформаційної технології обробки цього сигналу визначає прогнозоване значення амплітуди мікронерівностей поверхні деталі, яка обробляється. Ця технологія складає такі обчислювальні процедури: виділення сигналу девіацій та подання його обмеженим рядом Фур'є; визначення діючого значення та його порівняння з еталонними рівнями амплітуд девіацій. Якщо діюче значення сигналу девіацій перевищує встановлений виробничим завданням рівень то регулятор 4 корегує величини подач. Управляючі впливи на регулятори 1 та 2 у вигляді корегуючих уставок

подаються під час пауз між прямим і зворотнім ходом алмазного інструменту.

Моделювання каналів управління подачами круга. В динамічному відношенні первинний перетворювач поперечної подачі шліфувального круга подаємо аперіодичним ланцюгом з запізненням та деякою смугою нечутливості (Δ_1)

$$H_1(p) = \frac{\Delta_1 k_{П1} e^{-p\tau_{П1}}}{T_{П1}p + 1}, \tag{4}$$

де $k_{П1}, \tau_{П1}, T_{П1}$ - відповідно коефіцієнт передачі, запізнення та постійна часу блоку П1.

Похибка дискретизації аналогового сигналу цим блоком знаходить своє кількісне відображення у коливаннях його вихідного коду. На основі статистичної обробки експериментальних даних з використанням інформаційного підходу визначено закон розподілу [2]

$$f_1(x) = \frac{1}{2\sigma} e^{-\frac{|x|}{\sigma}} \quad \text{при} \quad x \in (-0.12, 0.12),$$

та похибку $\Delta_1 = \sigma e^{\frac{\mu_1}{\sigma}} = 0.05$.

Передаточну функцію екстраполятора нульового порядку подаємо у такому вигляді [3]

$$W_2(p) = \frac{1 - e^{-p\tau_r}}{p}. \tag{5}$$

Передатну функцію регулятора поперечною подачею як деякого довільного цифрового фільтру подаємо у вигляді [3]

$$W_3(p) = \frac{1}{\tau_r}\left(1 - e^{-p\tau_r}\right). \tag{6}$$

Передатні функції блоків ЕП1 та ВМ1 отримано у такому вигляді [2]

$$W_4(p) = \frac{k_M T_{k1}^2}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}. \tag{7}$$

де $a_4 = \tau_{тв} T_{тв} T_Э T_{дт} T_M$,

$a_3 = T_M\left[(\tau_{тв} + T_{тв})T_Э T_{дт} + \tau_{тв} T_{тв}(T_Э + T_{дт})\right] + \tau_{тв} T_{тв} T_Э T_{дт}$;

$a_2 = T_M\left[T_Э T_{дт} + \tau_{тв} T_{тв} + (\tau_{тв} + T_{тв})(T_Э + T_{дт})\right] + (\tau_{тв} + T_{тв})T_Э T_{дт} + \tau_{тв} T_{тв}(T_Э + T_{дт})$;

$a_1 = T_M(T_Э + T_{дт} + \tau_{тв} + T_{тв}) + T_Э T_{дт} + \tau_{тв} T_{тв} + (\tau_{тв} + T_{тв})(T_Э + T_{дт})$;

$a_0 = \tau_{тв} + T_{тв} + T_Э + T_{дт}$.

У результаті аналізу структурної схеми (рис. 3) та математичних перетворювань маємо таку передатну функцію каналу

$$W_5(p)=\frac{k_M}{p^2\left(a_4p^4+a_3p^3+a_2p^2+a_1p+a_0\right)}. \qquad (8)$$

В результаті аналізу полюсів виразу (8) встановлено, що канал для управління поперечною подачею шліфувального круга без суттєвих втрат точності подається такою передатною функцією

$$W_5(p)=\frac{b_1p}{(\varsigma T_{33}p+1)\left(\frac{T_{33}}{\varsigma}p+1\right)(T_{34}p+1)}. \qquad (9)$$

Блоки П1, Р1 та ЕП1 вносять запізнення в роботу каналу. В результаті досліджень встановлено, що це запізнення складає $2T_0$. З урахуванням цієї обставини z-перетворення виразів для передатних функцій каналу управління поперечною подачею за управляючим та збурювальним впливами мають наступний вигляд

$$W_6\left(z^{-1}\right)=z^{-2}\frac{b_0^\circ+b_1^\circ z^{-1}+b_2^\circ z^{-2}+b_3^\circ z^{-3}}{1+a_1^\circ z^{-1}+a_2^\circ z^{-2}+a_3^\circ z^{-3}},\ W_7\left(z^{-1}\right)=\frac{k_MT_M\left(1-l_4\right)z^{-1}}{1-\left(1+l_4\right)z^{-1}+l_4z^{-2}}, \qquad (10)$$

де $b_0^\circ=A_1+A_2+A_3$, $b_1^\circ=-\left[A_1+A_2+A_3+A_1\left(l_2+l_3\right)+A_2\left(l_1+l_3\right)+A_3\left(l_1+l_2\right)\right]$;

$b_2^\circ=A_1\left(l_2+l_3\right)+A_2\left(l_1+l_3\right)+A_3\left(l_1+l_2\right)+A_1l_2l_3+A_2l_1l_3+A_3l_1l_2$;

$b_3^\circ=-\left(A_1l_2l_3+A_2l_1l_3+A_3l_1l_2\right)$;

$a_1^\circ=-\left(A_1l_2l_3+A_2l_1l_3+A_3l_1l_2\right)$; $\quad a_2^*=l_2l_3+l_1l_3+l_1l_2$; $\quad a_3^\circ=-l_1l_2l_3$;

$l_1=e^{-\frac{T_0}{\varsigma T_{33}}}$, $\quad l_2=e^{-\frac{\varsigma T_0}{T_{33}}}$, $\quad l_3=e^{-\frac{T_0}{T_{34}}}$;

$$A_1=\frac{b_1T_{34}}{T_{33}T_{34}\left(\varsigma^2+1\right)-\varsigma\left(T_{33}^2-T_{34}^2\right)}+\frac{b_1\varsigma}{\left(\varsigma T_{34}-T_{33}\right)\left(1-\varsigma^2\right)};$$

$$A_2=\frac{b_1\varsigma}{\left(\varsigma T_{34}-T_{33}\right)\left(\varsigma^2-1\right)}; \qquad A_3=\frac{b_1T_{34}}{\varsigma\left(T_{33}^2-T_{34}^2\right)-T_{33}T_{34}\left(\varsigma^2+1\right)}.$$

В основу розробки цифрового регулятора поперечною подачею покладено принцип його синтезу на базі еталонної моделі каналу з використання квадратичного критерію якості. Закон оптимального управління поперечною подачею шліфувального круга сформульовано у такому вигляді

$$D\left(z^{-1}\right)u_t=R_1\left(z^{-1}\right)y_{m,t+d+1}-F\left(z^{-1}\right)y_t, \qquad (11)$$

де $y_{m,t+d+1}$ - прогнозоване значення вихідного сигналу каналу, ступеневі поліноми мають вигляд $R_1\left(z^{-1}\right)=\frac{\Delta_1k_MT_M\left(1-l_4\right)}{\varepsilon_{доп}}z^{-1}$,

$D\left(z^{-1}\right)=g_0+g_1z^{-1}+g_2z^{-2}$, $F\left(z^{-1}\right)=f_0+f_1z^{-1}+f_2z^{-2}$.

Коефіцієнти цих поліномів такі

$$f_0 = 1,\ f_1 = \frac{a_1^\circ + 1}{a_1^\circ},\ f_2 = \frac{a_1^\circ a_2^\circ + a_1^\circ + a_2^\circ}{a_1^\circ a_2^\circ};$$

$$g_0 = \frac{b_0^\circ}{a_0^\circ},\ g_1 = \frac{b_1^\circ - \frac{b_0^\circ a_1^\circ}{a_0^\circ} + \frac{b_0^\circ\left(a_1^\circ + 1\right)}{a_1^\circ}}{a_0^\circ},$$

$$g_2 = \frac{b_2^\circ + \frac{b_1^\circ\left(a_1^\circ + 1\right)}{a_1^\circ} + \frac{b_2^\circ\left(a_1^\circ a_2^\circ + a_1^\circ + a_2^\circ\right)}{a_1^\circ a_2^\circ} - \frac{b_0^\circ a_2^\circ}{a_0^\circ} - a_1^\circ\left[b_1^\circ - \frac{b_0^\circ a_1^\circ}{a_0^\circ} + \frac{b_0^\circ\left(a_1^\circ + 1\right)}{a_1^\circ}\right]}{a_0^\circ}.$$

На основі виразу (8) в результаті перетворень отримана в роботі [2] передатна функція цифрового регулятора 1

$$W_1\left(z^{-1}\right) = \frac{H\left(z^{-1}\right)B\left(z^{-1}\right)}{b_0^\circ A\left(z^{-1}\right) + D\left(z^{-1}\right)B\left(z^{-1}\right)}. \qquad (12)$$

В останньому виразі коефіцієнти ступеневого поліному $H\left(z^{-1}\right)$ мають такий вигляд

$$h_0 = \frac{\Delta_1 k_M T_M\left(1 - l_4\right)}{\varepsilon_{доп}} b_0^\circ,\ h_1 = \frac{\Delta_1 k_M T_M\left(1 - l_4\right)b_1^\circ}{\varepsilon_{доп} a_1^\circ};$$

$$h_2 = \frac{\Delta_1 k_M T_M\left(1 - l_4\right)b_2^\circ}{\varepsilon_{доп} a_2^\circ},\ h_3 = \frac{\Delta_1 k_M T_M\left(1 - l_4\right)b_3^\circ}{\varepsilon_{доп} a_3^\circ}.$$

Після підстановки коефіцієнтів та математичних перетворень виразу (10) маємо таке

$$W_1\left(z^{-1}\right) = 767.113\frac{2.3 - 3.453z^{-1} + 1.33z^{-2}}{0.262 + 0.008z^{-1} + 0.2182z^{-2}}. \qquad (13)$$

На основі виразів (10) та (13) побудована імітаційна модель каналу для управління поперечною подачею шліфувального круга (рис. 4). Імітаційним моделюванням отримано графік вихідного сигналу цього каналу (рис. 5).

У результаті аналізу структурної схеми каналу для управління поздовжньою подачею алмазного інструменту із застосуванням імітаційного моделювання та математичного апарата z-перетворень отримано наступні вирази для передатних функцій за управляючим та збурювальним впливами

$$W_8\left(z^{-1}\right) = z^{-2}\frac{b_0^\circ + b_1^\circ z^{-1} + b_2^\circ z^{-2} + b_3^\circ z^{-3}}{1 + a_1^\circ z^{-1} + a_2^\circ z^{-2} + a_3^\circ z^{-3}},\ W_9\left(z^{-1}\right) = \frac{k_M z^{-1}\left[1 - T_M + \left(T_M - l_4\right)z^{-1}\right]}{1 - \left(1 + l_4\right)z^{-1} + l_4 z^{-2}}.$$

У цих виразах враховано запізнювання, яке вносять блоки П2, екстраполятор та ЕП2, в роботу каналу.

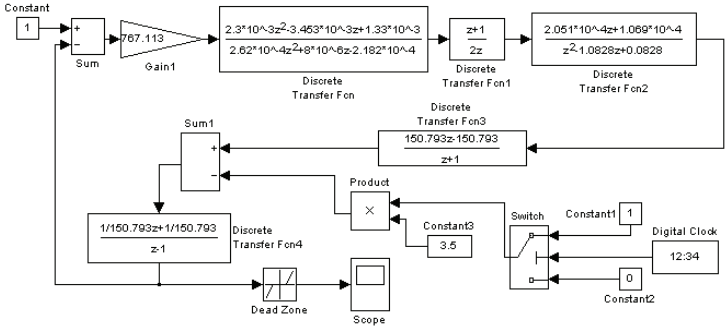

Рис. 4 – Імітаційна модель каналу для управління поперечною подачею

В основу розробки цифрового регулятора 2 в умовах дії випадкових завад покладено принцип його синтезу на базі еталонної моделі каналу. Мінімізацією квадратичного критерію якості отримана його передатна функція

$$W_2\left(z^{-1}\right)=\frac{0.04752+0.862z^{-1}-0.823z^{-2}}{0.374-0.374z^{-1}}. \qquad (14)$$

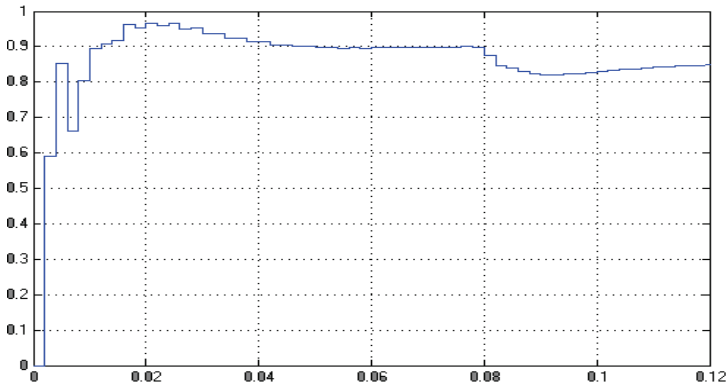

Рис. 5 – Вихідний сигнал імітаційної моделі

На основі виразів (10) та (15) побудована імітаційна модель каналу для управління поздовжньою подачею шліфувального круга (рис. 6). Імітаційним моделюванням отримано графік вихідного сигналу (рис. 7).

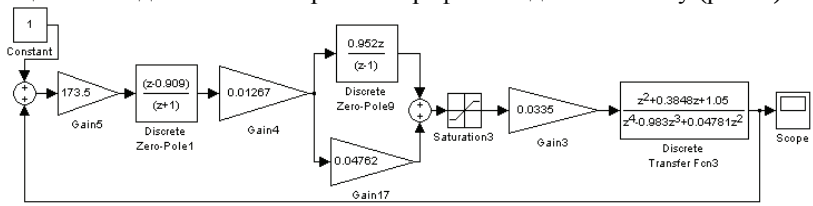

Рис. 6 – Імітаційна модель каналу управління поздовжньою подачею

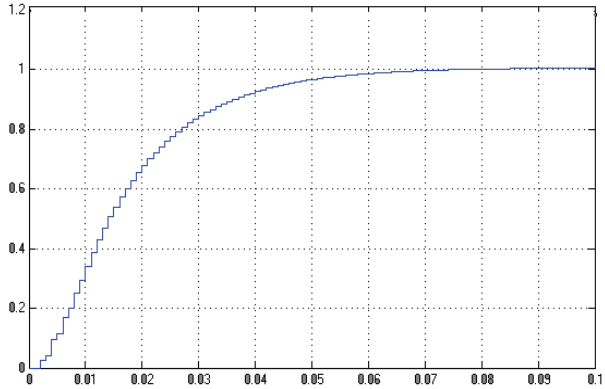

Рис. 7 – Вихідний сигнал імітаційної моделі

Алгоритми покоординатного управління поперечною та поздовжньою подачами шліфувального круга розроблено з урахуванням обмежень, які накладає на їхні величини умова отримання прогнозованого значення амплітуди мікронерівностей обробленої поверхні деталі. Ці обмеження закладено в наступний алгоритм програмного завдання регулятором 1 величини поперечної подачі шліфувального круга:

- програма обробки партії деталей задає припустиме значення амплітуди мікронерівностей R_z обробленої поверхні деталі;
- регулятор 1 на підставі аналізу банку даних вибирає Q_1 і задає чорновий цикл обробки деталі $S_{поп} = Q_1 S_{поп,т}$;
- він періодично після виконання шліфувальним кругом одного проходу обчислює поточний припуск обробки $h = h_н - kS_{поп}$, $\partial e\ k = 0,1,2,\ldots$;
- якщо $h_н - kS_{поп} \le h_k$, то регулятор 1 задає чистовий цикл обробки деталі $S_{поп} = Q_1 \left[S_{поп,к} + \left(S_{поп,т} - S_{поп,к} \right) \dfrac{h}{h_k} \right]$.

На основі алгоритму програмного завдання регулятором 1 величини поперечної подачі шліфувального круга, а також такої детермінованої математичної моделі виконуючого механізму

$$U(t) = b_1 \left[e(t) + T_{\partial 1} \frac{de(t)}{dt} + T_{\partial 2}^2 \frac{d^2 e(t)}{dt^2} + T_{\partial 3}^3 \frac{d^3 e(t)}{dt^3} \right] \qquad (15)$$

отримано позиційний алгоритм управління нею в наступному вигляді

$$U_n = U_{n-1} + b_1 \left(1 + \frac{T_{\partial 1}}{T_0} \right) e_n - b_1 \left(1 + \frac{2T_{\partial 1}}{T_0} \right) e_{n-1} + \frac{b_1 T_{\partial 1}}{T_0} e_{n-2}. \qquad (16)$$

В основу розробки алгоритму управління поздовжньою подачею

шліфувального круга покладено те, що вона за своєю сутністю є швидкість руху виконуючого механізму. У результаті математичних перетворень швидкісний алгоритм управління цією подачею отримано в такому вигляді

$$U_n = U_{n-1} + K_p\left(\frac{T_0}{2T_n} + \frac{T_д}{T_0}\right)e_n + K_p\left(\frac{T_0}{2T_n} - \frac{2T_д}{T_0}\right)e_{n-1} + K_p\frac{T_д}{T_0}e_{n-2} \quad . \tag{17}$$

Функціонування системи покоординатного управління шліфувальними верстатами на підставі розроблених алгоритмів організовано за допомогою середи реального часу, з перериваннями в залежності від ходу технологічного процесу алмазного шліфування.

Висновок. На підставі аналізу графіків встановлено, що розроблені канали задовольняють вимогам системи по швидкодії перетворення та якості регулювання. Встановлено також, що розроблене прикладне програмне забезпечення для цифрових регуляторів 1 та 2 забезпечує покоординатне управління процесами алмазного шліфування. Обгрунтовано, що девіації швидкості обертання шліфувального круга є джерелом непрямої інформації про фактичну амплітуду мікронерівностей поверхні деталі, яка обробляється верстатом, та сигналом зворотного зв'язку, який містить в собі інформацію про відхилення прогнозованого квалітету чистоти від його встановленого значення програмою обробки партії деталей

Список літератури: 1. *Еникеев А.Ф.* Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования. – Краматорск: ДГМА, 2001. – 160 с. **2.** Синтез цифрового регулятора поперечної передачі шліфувального круга / *Єнікєєв О.Ф., Зиков І.С.* // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: №57, 2008.– С. 87-93. **3.** Основи синтезу і проектування слідкуючих систем верстатів та промислових роботів: Навчальний посібник / *Єнікєєв О.Ф., Суботін О.В.* – Краматорськ: ДДМА, 2008. – 268 с.

Поступила в редколлегию 06.06.11