

УДК 681.518.3

О.Ф. Єнікєєв<sup>1</sup> (д-р тех. наук, доц.), О.В. Суботін<sup>1</sup> (канд. техн. наук, доц.),  
О.В. Разживін<sup>1</sup> (канд. техн. наук, доц.), І.Б. Абрамська<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ

<sup>2</sup>Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків

E-mail: al\_enikeev@bigmir.net, o.v.subotin@ukr.net;

razzhivin@ukr.net, bogdana.2013@ukr.net

## КОМП'ЮТЕРНА СИТЕМА ПРОГРАМНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ

*Розроблено концепцію програмного керування рухами апаратних засобів задля скорочення циклу обробки деталі та забезпечення прогнозованих мікронерівностей поверхні. Побудована архітектура тривимірної триступеневої комп'ютерної системи з використанням ієрархічного принципу, методів безпосереднього цифрового керування та керування зі зворотним зв'язком за станом, а також непрямого контролю амплітуди мікронерівностей поверхні деталі. Розроблено детерміновані математичні моделі апаратних засобів системи з урахуванням запізнювання та дії випадкових перешкод. Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням еталонних моделей синтезовано апаратні засоби цифрової обробки сигналів. На основі частотного подання вхідного сигналу розроблений критерій вибору періоду дискретизації.*

**Ключові слова:** алмазне шліфування, апаратні засоби, перетворення, мікронерівності, комп'ютерна система.

**Вступ.** Недоліком відомих систем програмного керування процесом алмазного шліфування (АШ) є відсутність сигналу зворотного зв'язку щодо поточного стану якості поверхні деталі, що оброблюється шліфувальним верстатом (ШВ). Побудова замкнених комп'ютерних систем (КС) зі зворотнім зв'язком по стану мікронерівностей неможлива у зв'язку з відсутністю відповідних первинних перетворювачів. Підвищення ефективності процесів АШ також досягається за рахунок використання КС апаратних засобів для періодичної правки круга з метою періодичного відновлення його ріжучої спроможності [1].

**Постановка завдання для досліджень.** Пропонується використання девіацій швидкості обертання шліфувального круга (ШК) в якості вхідного сигналу для оцінювання мікронерівностей поверхні деталі, яка оброблюється ШВ. Еталонні рівні девіацій визначено на основі квалітетів чистоти та внесено до банку даних КС у вигляді нормативів [1]. Девіації є сигналом зворотного зв'язку, який містить в собі інформацію про відхилення прогнозованого квалітету чистоти від встановленого програмою обробки партії деталей. Пропонується також процес алмазно-іскрового шліфування (АШ) у якості методу автоматичної правки ШК на металевому зв'язуванні. В основу розробки апаратних засобів покладено непрямі методи оцінювання ріжучої спроможності ШК та побудова нового технологічного циклу обробки поверхні деталі.

**Метою статі** є розробка апаратних засобів та інформаційної технології підвищення ефективності процесу АШ. Досягнення мети забезпечується розв'язанням таких завдань:

- розробка концепції програмного керування КС рухами апаратних засобів щодо скорочення часу обробки деталі та забезпеченню прогнозованих мікронерівностей;
- побудова архітектури тривимірної триступеневої КС зі зворотним зв'язком за станом;
- розробка детермінованих математичних моделей апаратних засобів;
- встановлення вимог щодо вибору періоду дискретизації вхідних сигналів.

**Нова концепція підвищення ефективності АШ.** Структурна схема програмного керування КС рухами апаратних засобів щодо скорочення циклу обробки деталі та забезпеченню заданого квалітету чистоти її обробленої поверхні подано на рис. 1. Як програмні впливи на виконуючі механізми ШВ по досягненню поставленої мети використані поперечна та повздовжня подачі ШК, а також його швидкість обертання [9]. На рис. 1 позначено:  $\bar{U} = (u_1, u_2, \dots, u_i)^T$  – вектор програмних впливів КС на виконуючі механізми,  $\bar{X} = (S_{non}, S_{np}, f_{кр})^T$  – вектор стану ШВ,  $R_z$  – амплітуда мікронерівностей,  $\Delta\omega$  – сигнал девіацій,  $\bar{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)^T$  – вектор випадкових завад,  $\bar{Q} = (\Delta_{em}, S_{non,ont}, S_{np,ont}, f_{кр,ont})^T$  – вектор уставок процесу АШ.

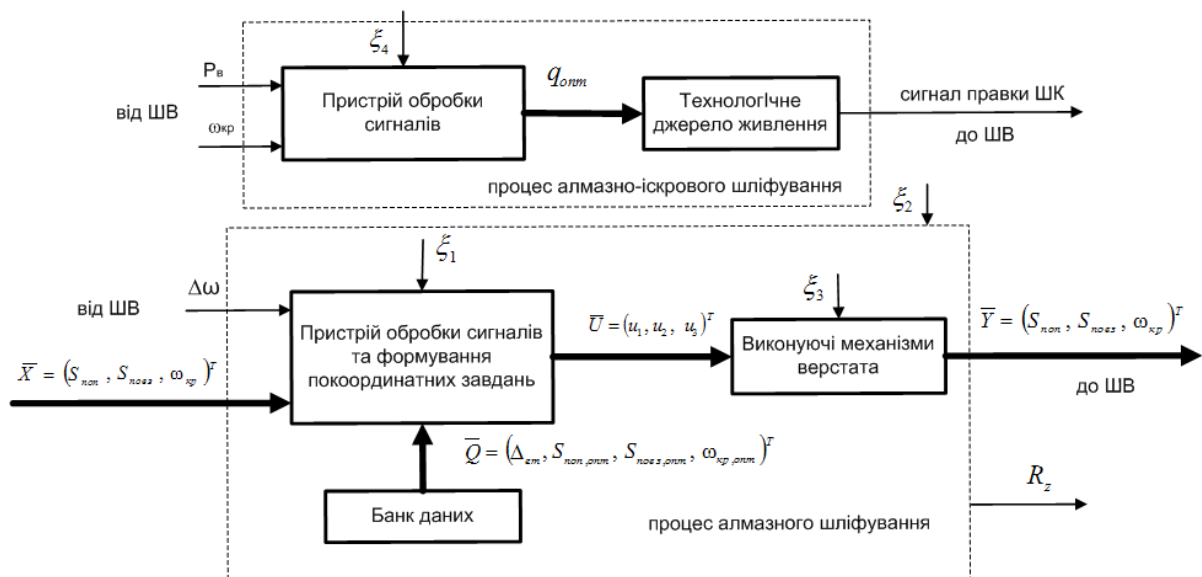


Рисунок 1 – Концепція програмних рухів апаратних засобів

У основу розробки архітектури КС покладено мікроконтролер МС68НС912В32, методи безпосереднього цифрового та покоординатного управління, ієрархічний принцип, непрямі вимірювання мікронерівностей та різальних властивостей ШК, а також принципи децентралізації та мультиплексування шин адреси та даних [10]. Структурна схема тривимірної триступінчастої КС подана на рис. 2.

На рис.2 позначено: Д – первинний перетворювач; П1...П4 – перетворювачі вихідного сигналу Д у цифровий код; ЕП – електричний привод; ВМ – виконуючий механізм верстата; К – комутатор сигналів; I, U – відповідно струм та напруга ВМ1;  $P_в$  – потужність приводу обертання шліфувального круга; ШГІ – генератор сигналів; ВПП – вимірювальний перетворювач потужності; П5 – вимірювач параметрів сигналу ШГІ; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;  $q, q_{ont}$  – генерований та оптимальний сигнали уставок;  $S_{non}, S_{np}$  – відповідно поперечна та повздовжня подачі круга;  $\omega_{кр}$  – середня швидкість обертання круга;  $\Delta\omega$  – девіації;  $Y_{кр}, Y_{non}, Y_{np}$  – вихідні параметри відповідних виконуючих механізмів.

Інформаційний зв'язок між КС та процесом АШ забезпечують сигнали подачі та швидкості обертання ШК. Апаратні засоби першого ступеня КС задають параметри АШ, які зберігає банк даних у вигляді відповідного вектора. Вихідні сигнали формуються ними під час прямої або зворотної ходи ШК.

Сигнал миттєвої швидкості обертання ШК є вхідним для апаратних засобів другого ступеня. Пристрій 4 на основі прямих вимірювань миттєвої швидкості та за допомогою інформаційної технології [8] обробки цього сигналу визначає мікронерівності поверхні деталі, амплітуда яких прогнозується.

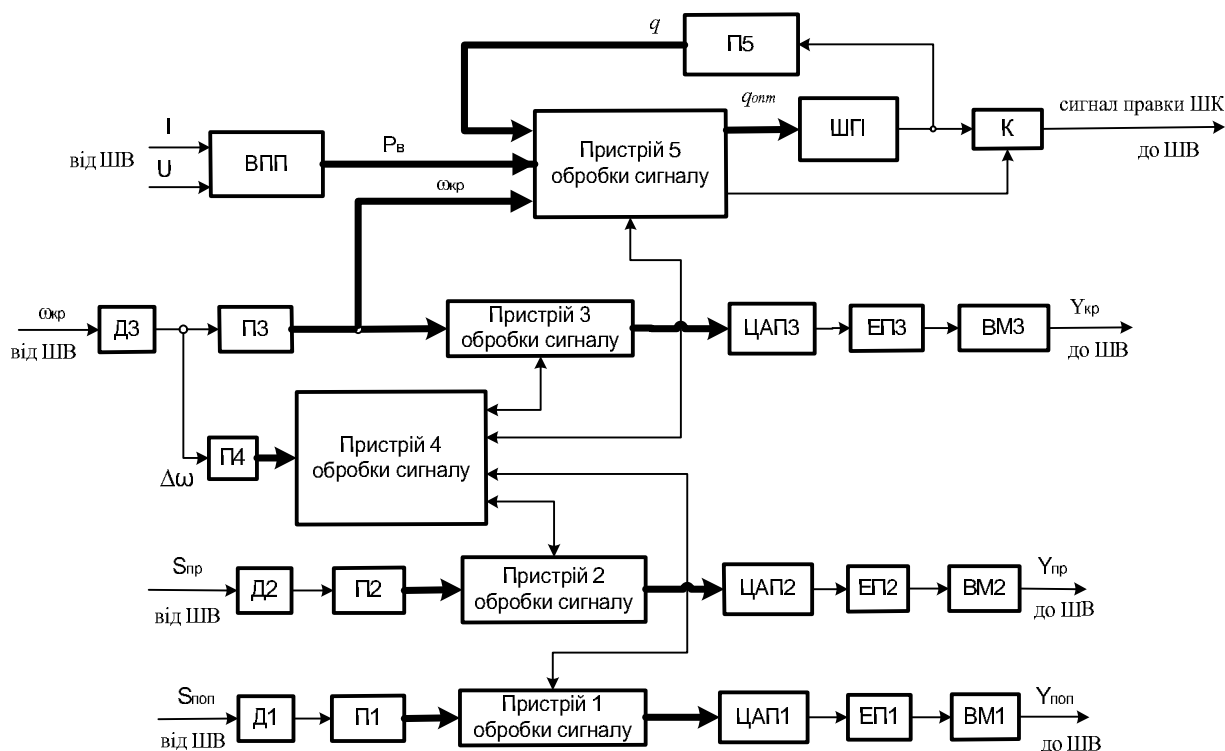


Рисунок 2 – Структурна схема тривимірної триступінчастої КС

Алгоритм обробки сигналу швидкості складається з таких обчислювальних процедур: виділення сигналу девіацій та подання його обмеженим рядом Фур'є; визначення діючого значення та його порівняння з еталонним рівнем, котрий встановлено програмою обробки партії деталей. Якщо амплітуда мікронерівностей перевищує рівень, заданий прийнятим «квалітетом» чистоти поверхні деталі, то пристрій 4 аналізує банк даних та формує сигнали коригування подач. Пристрої 1, 2 та 3 оброблюють ці сигнали під час пауз між прямою та зворотною ходою ШК. ВМ1-ВМ3 задають нові параметри АШ.

Інформаційний зв'язок між процесом АШ та апаратними засобами третього ступеня КС забезпечують сигнали струму та напруги ВМ3, а також сигнал швидкості обертання. На основі допускового контролю та непрямих вимірювань різальної властивості ШК вони реалізують нову технологію безперервної обробки поверхні деталі, яка поєднує процеси АШ та АПШ. Інформаційний зв'язок між апаратними засобами третього ступеня та процесом АПШ забезпечує сигнал правки круга, електричні параметри якого вимірює П5.

Паралельний інтерфейс забезпечує інформаційний зв'язок між блоками П1-П4, ВПП та пристроями 1 – 5, між пристроями 1 – 3 та ЦАП1 – ЦАП3, а також пристроєм 5 та ШП. Процеси обміну даних між пристроями 1 – 5 забезпечує послідовний інтерфейс.

**Моделювання елементів КС.** Методика аналізу лінійних апаратних засобів полягає у наступному:

- виконати моделювання апаратних засобів з урахуванням полоси нечутливості датчика, яку визначаємо у результаті статистичної обробки експериментальних даних;
- побудувати модель апаратних засобів у вигляді передатних функцій за керуючим впливом;
- виконати дослідження збурюючих впливів;
- мінімізацією квадратичного критерію якості визначити передатну функцію пристрою цифрової обробки сигналів;
- на основі частотного подання вхідного впливу з використанням теореми згортки отримати вихідний сигнал апаратних засобів;
- побудувати схеми комп'ютерного моделювання.

Під час виконання досліджень z-перетворення передатної функції апаратних засобів для підтримки постійної швидкості обертання ШК отримано в такому вигляді [2]

$$W_2(z) = \frac{\Delta_n k_o (c_1 + c_2 z^{-1}) z^{-1}}{\left(1 - e^{-\frac{T_0}{T_{14}}} z^{-1}\right) \left(1 - e^{-\frac{T_0}{T_{15}}} z^{-1}\right)}; 0 \quad (1)$$

$$c_1 = 1 + \frac{T_{15} e^{-\frac{T_0}{T_{15}}} - T_{14} e^{-\frac{T_0}{T_{14}}}}{T_{14} - T_{15}}; c_2 = e^{-\frac{T_0}{T_{14}}} e^{-\frac{T_0}{T_{15}}} + \frac{T_{15} e^{-\frac{T_0}{T_{15}}} - T_{14} e^{-\frac{T_0}{T_{14}}}}{T_{14} - T_{15}},$$

де  $\Delta_n$  – довірчий інтервал вимірювань швидкості обертання ШК первинним перетворювачем, який отримано на основі інформаційного підходу у результаті статистичної обробки дослідних даних [2];  $k_o, T_o$  - коефіцієнт передачі й запізнювання двигуна ЕП;  $T_{ij}$  – запізнювання передачі інформації між блоками  $i$  та  $j$ .

Отримана передатна функція пристрою 3 (див. рис. 2) цифрової обробки сигналу швидкості у такому вигляді [2]:

$$W_{ПЗ}(z) = 1.206 \frac{z^2 - 0.1706z}{z^2 - 0.995z - 5.019 \cdot 10^{-3}}. \quad (2)$$

Первинний перетворювач та виконуючий механізм вносять запізнення у роботу апаратних засобів завдання поперечної подачі ШК.

Z-перетворення виразів для передатних функцій за управляючим та збурювальним впливами мають такий вигляд [3]:

$$W_3(z^{-1}) = z^{-2} \frac{b_0^\circ + b_1^\circ z^{-1} + b_2^\circ z^{-2} + b_3^\circ z^{-3}}{1 + a_1^\circ z^{-1} + a_2^\circ z^{-2} + a_3^\circ z^{-3}}, \quad W_4(z^{-1}) = \frac{k_M T_M (1 - l_4) z^{-1}}{1 - (1 + l_4) z^{-1} + l_4 z^{-2}}, \quad (3)$$

де  $k_M, T_M$  – коефіцієнт передачі й постійна часу виконуючого механізму;  $l_4$  – коефіцієнт перетворення.

У виразах (3) врахована зона нечутливості первинного перетворювача, яку визначено на основі інформаційного підходу у результаті статистичної обробки дослідних даних [7].

При визначенні вхідного впливу апаратних засобів для завдання поперечної подачі ШК враховано, що пряма та зворотна хода круга утворюють період основної гармоніки частотного подання вхідного впливу.

На підставі цього словесного опису найбільш повно поставленому завданню відповідає такий сигнал [1]:

$$S_{non}(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } -\pi < \Omega t < -\pi + \alpha, -\alpha < \Omega t < \alpha, \pi - \alpha < \Omega t < \pi; \\ S_{non}, & \text{якщо } \alpha < \Omega t < \pi - \alpha; \\ -S_{non}, & \text{якщо } -\pi + \alpha < \Omega t < -\alpha, \alpha > 0, 0 < \alpha < 0,5\pi, \end{cases} \quad (4)$$

де  $\alpha = \frac{\Omega}{2}(t_1 - t_2)$ ,  $t_2$  – час взаємодії ШК з поверхнею деталі;  $\Omega$  – кругова частота першої гармоніки частотного подання сигналу девіацій.

Перетворення Фур'є для сигналу (4) має наступний вигляд:

$$S_{non}(t) = \frac{4S_{non}}{\pi} \sum_{k=1}^n \frac{1}{2k-1} \cos \left[ \frac{(2k-1)\Omega}{2} (t_1 - t_2) \right] \sin (2k-1)\Omega t, \quad (5)$$

Виконаємо заміну гармонійних складових сумою експоненціальних сигналів:

$$S_{non}(t) = \sum_{k=1}^n \frac{4S_{non}}{\pi(2k-1)} \cos \left[ \frac{(2k-1)\Omega}{2} (t_1 - t_2) \right] \{ e^{j[(2k-1)\Omega t - 0.5\pi]} - e^{-j[(2k-1)\Omega t - 0.5\pi]} \}. \quad (6)$$

Розв'язування задачі Коші для диференціальних рівнянь, які описують процеси перетворення інформації апаратними засобами завдання поперечної подачі круга, виконаємо з використанням теореми про згортку. Після застосування зворотного перетворення Лапласу до передатної функції та математичних перетворень отримали:

$$W_3(t) = B_{33} e^{-\frac{1}{\zeta T_{33}} t} + B_{34} e^{-\frac{T_{33} t}{\zeta}} + B_{35} e^{-\frac{1}{T_{34}} t}, \quad (7)$$

де  $B_{33} = \frac{b_1 \zeta}{T_{33}(1-\zeta^2)(\zeta T_{33} - T_{34})}$ ,  $B_{34} = \frac{b_1 \zeta^2}{T_{33}(1-\zeta^2)(\zeta T_{34} - T_{33})}$ ,  $B_{35} = \frac{b_1 \zeta}{(\zeta T_{34} - 1)(\zeta T_{33} - T_{34})}$ ,  $b_1 = k_M T_{k1}^2 k_{II} \tau_r$ ,  $T_{k1}$  – постійна часу ланки, яка корегує амплітудно-частотну характеристику апаратних засобів;  $\zeta$  – випадкова завада.

За допомогою теореми згортки на основі виразів (6) та (7) отримали вихідний сигнал апаратних засобів програмного завдання поперечної подачі ШК:

$$\begin{aligned} y_{non}(t) = & B_{33} e^{-\frac{t}{\zeta T_{33}}} \sum_{k=1}^n \frac{2A_{2k-1} T_{33} \zeta}{\sqrt{1 + T_{33}^2 \zeta^2 (2k-1)^2 \Omega^2}} e^{j[0.5\pi - \arctg T_{33} \zeta (2k-1)\Omega]} + \\ & + B_{34} e^{-\frac{T_{33} t}{\zeta}} \sum_{k=1}^n \frac{2A_{2k-1} \zeta}{\sqrt{T_{33}^2 + \zeta^2 (2k-1)^2 \Omega^2}} e^{j \left[ 0.5\pi - \arctg \frac{(2k-1)\Omega \zeta}{T_{33}} \right]} + \\ & + B_{35} e^{-\frac{1}{T_{34}} t} \sum_{k=1}^n \frac{2A_{2k-1} T_{34}}{\sqrt{1 + T_{34}^2 (2k-1)^2 \Omega^2}} e^{j[0.5\pi - \arctg T_{34} (2k-1)\Omega]}. \end{aligned} \quad (8)$$

На основі виразів (3) отримана передатна функція пристрою 1 (див. рис. 2) цифрової обробки сигналу поперечної подачі у такому вигляді [3]:

$$W_{II}(z^{-1}) = 767.113 \frac{2.3 - 3.453z^{-1} + 1.33z^{-2}}{0.262 + 0.008z^{-1} + 0.2182z^{-2}}. \quad (9)$$

Отримано наступні вирази для передатних функцій за керуючим та збурювальним впливами [4] апаратних засобів програмного завдання поздовжньої подачі ШК:

$$W_5(z^{-1}) = z^{-2} \frac{b_0^\circ + b_1^\circ z^{-1} + b_2^\circ z^{-2} + b_3^\circ z^{-3}}{1 + a_1^\circ z^{-1} + a_2^\circ z^{-2} + a_3^\circ z^{-3}}, \quad W_6(z^{-1}) = \frac{k_M z^{-1} [1 - T_M + (T_M - l_4) z^{-1}]}{1 - (1 + l_4) z^{-1} + l_4 z^{-2}}. \quad (10)$$

У цих виразах враховано запізнювання, яке вносять відповідно пристрої П2, екстраполятор та ЕП2.

Також враховано зону нечутливості первинного перетворювача, яку визначено на основі інформаційного підходу у результаті статистичної обробки дослідних даних.

При поданні вхідного впливу апаратних засобів програмного завдання повздовжньої подачі ШК ще враховано те, що вона за своєю сутністю являє швидкість переміщення приводу:

$$S'_{np}(t) = \sum_{k=1}^n \frac{2S_{np}}{\pi} \cos\left[\frac{(2k-1)\Omega}{2}(t_1-t_2)\right] \left[ e^{j(2k-1)\Omega t} + e^{-j(2k-1)\Omega t} \right]. \quad (11)$$

Після застосування зворотного перетворення Лапласу до передатної функції апаратних засобів завдання повздовжньої подачі та математичних перетворень отримали:

$$W_5(t) = B_{36} e^{-\frac{1}{T_{35}}t} + B_{37} e^{-\frac{1}{T_{36}}t} + B_{38} e^{-\frac{1}{T_{37}}t}, \quad (12)$$

$$\text{де } B_{36} = \frac{b_1}{(T_{36} - T_{35})(T_{35} - T_{37})}, \quad B_{37} = \frac{b_1}{(T_{36} - T_{35})(T_{37} - T_{36})}, \quad B_{38} = \frac{b_1}{(T_{37} - T_{36})(T_{35} - T_{37})}.$$

За допомогою теореми згортки на основі виразів (11) та (12) отримали вихідний сигнал апаратних засобів [10]:

$$\begin{aligned} y_{np}(t) = & B_{36} e^{-\frac{1}{T_{35}}t} \sum_{k=1}^n \frac{B_{2k-1} T_{35}}{\sqrt{1 + T_{35}^2 (2k-1)^2 \Omega^2}} \left[ e^{j \arctg T_{35} (2k-1) \Omega} - e^{-j \arctg T_{35} (2k-1) \Omega} \right] + \\ & + B_{37} e^{-\frac{1}{T_{36}}t} \sum_{k=1}^n \frac{B_{2k-1} T_{36}}{\sqrt{1 + T_{36}^2 (2k-1)^2 \Omega^2}} \left[ e^{j \arctg T_{36} (2k-1) \Omega} - e^{-j \arctg T_{36} (2k-1) \Omega} \right] + \\ & + B_{38} e^{-\frac{1}{T_{37}}t} \sum_{k=1}^n \frac{B_{2k-1} T_{37}}{\sqrt{1 + T_{37}^2 (2k-1)^2 \Omega^2}} \left[ e^{j \arctg T_{37} (2k-1) \Omega} - e^{-j \arctg T_{37} (2k-1) \Omega} \right] \end{aligned}$$

Передатна функція пристрою 2 (див. рис. 2) цифрової обробки сигналу повздовжньої подачі ШК [4]:

$$W_{П2}(z^{-1}) = \frac{0.04752 + 0.862z^{-1} - 0.823z^{-2}}{0.374 - 0.374z^{-1}}. \quad (13)$$

В результаті аналізу апаратних засобів вимірювань девіацій із застосуванням комп'ютерного моделювання та апарату z-перетворень отримано передатну функцію [5]:

$$W_7(z^{-1}) = z^{-1} \frac{b_1^* z^{-1}}{1 + a_1^* z^{-1} + a_2^* z^{-2}}. \quad (14)$$

У виразі (14) враховані запізнення та похибка вимірювань девіацій, яку визначено на основі інформаційного підходу у результаті статистичної обробки дослідних даних.

Подаємо вхідний вплив апаратних засобів вимірювань девіацій у вигляді обмеженого ряду Фур'є.

Після заміни гармонійних складових сумою експоненціальних сигналів маємо:

$$\Delta\omega(t) = \sum_{k=1}^{10} A_k \left[ e^{j(k\Omega t + \psi_k - 0.5\pi)} - e^{-j(k\Omega t + \psi_k + 0.5\pi)} \right]. \quad (15)$$

Після застосування зворотного перетворення Лапласу до передатної функції апаратних засобів вимірювань девіацій та перетворень отримали:

$$W_7(t) = B_{39} e^{-\frac{1}{T_{38}}t} + B_{40} e^{-\frac{1}{T_{39}}t}, \quad (16)$$

де  $B_{39} = \frac{\Delta_5 k_{\partial 3} k_{П4}}{T_{38}(T_{39} - T_{38})}$ ,  $B_{40} = \frac{\Delta_5 k_{\partial 3} k_{П4}}{T_{39}(T_{39} - T_{38})}$ ,  $T_{38} = T_{\partial 3}$ ,  $T_{39} = \tau_{П4}$ ,  $\Delta_5$  – похибка вимірювань девіацій,  $\tau_{П4}$  – запізнення, яке вносить пристрій П4 у роботу апаратних засобів.

За допомогою теореми про згортку на основі виразів (15) та (16) отримали вихідний сигнал апаратних засобів вимірювань девіацій [9]:

$$y_{oc}(t) = B_{39} e^{-\frac{1}{T_{38}}t} \sum_{k=1}^{10} \frac{A_k T_{38}}{\sqrt{1 + T_{38}^2 k^2 \Omega^2}} \left[ e^{j(\psi_k + 0.5\pi - \arctg T_{38} k \Omega)} - e^{-j(\psi_k + 0.5\pi + \arctg T_{38} k \Omega)} \right] + \\ + B_{40} e^{-\frac{1}{T_{39}}t} \sum_{k=1}^n \frac{A_k T_{39}}{\sqrt{1 + T_{39}^2 k^2 \Omega^2}} \left[ e^{j(\psi_k + 0.5\pi - \arctg T_{39} k \Omega)} - e^{-j(\psi_k + 0.5\pi + \arctg T_{39} k \Omega)} \right].$$

Отримана передатна функція пристрою 4 (див. рис. 2) цифрової обробки сигналу миттєвої швидкості в такому вигляді [5]:

$$W_{П4}(z^{-1}) = \frac{1.54 - 2.096z^{-1} + 0.616z^{-2}}{2.574 + 0.083z^{-1} - 2.156z^{-2}}. \quad (17)$$

З аналізу структурної схеми КС із застосуванням математичного апарату z-перетворень маємо такий вираз для дискретної передатної функції апаратних засобів, які задають шпаруватість сигналу ТДЖ при процесі АПШ [6]:

$$W_8(z) = \frac{k_{ТПП} T_z (T_z + K_{OY} T_{np}) \frac{T_1}{T_3 - T_2} \left( e^{-\frac{T_0}{T_3}} + e^{-\frac{T_0}{T_2}} \right) z^{-1}}{\left( 1 - e^{-\frac{T_0}{T_2}} z^{-1} \right) \left( 1 - e^{-\frac{T_0}{T_3}} z^{-1} \right)}, \quad (18)$$

де  $k_{ТПП}$ ,  $T_z$  – коефіцієнт передачі й постійна часу генератору сигналів;  $K_{OY}$ ,  $T_{np}$  – коефіцієнт передачі й постійна часу підсилювача сигналів.

Після застосування зворотного перетворення Лапласу до передатної функції апаратних засобів третього ступеню та математичних перетворень отримано:

$$W_8(t) = B_{41} e^{-\frac{1}{T_{17}}t} + B_{42} e^{-\frac{1}{T_{18}}t}, \quad (19)$$

$$\text{де } B_{41} = \frac{K_{\text{ТПП}} T_z (T_z + K_{\text{ОУ}} T_{\text{нр}})}{T_{17} (T_{18} - T_{17})}, B_{42} = \frac{K_{\text{ТПП}} T_z (T_z + K_{\text{ОУ}} T_{\text{нр}})}{T_{18} (T_{17} - T_{18})}.$$

Подаємо вхідний вплив апаратних засобів третього ступеню КС у вигляді функції Хевісайда. На основі виразу (19) за допомогою теореми про згортку отримали вихідний сигнал:

$$y_{P3}(t) = 1(t) + \frac{B_{42} T_{18}}{T_{18} + 1} e^{-\frac{T_{18}}{T_{18} + 1} t} - \frac{B_{41} T_{17}}{T_{17} + 1} e^{-\frac{T_{17}}{T_{17} + 1} t}. \quad (20)$$

Одержали передатну функцію пристрою 5 [6]:

$$W_{П5}(z) = \frac{k_{\text{ТПП}} T_z (T_z + K_{\text{ОУ}} T_{\text{нр}}) \frac{\tau_r}{T_3 - T_2} \left[ z^2 + \left( e^{-\frac{T_0}{T_3}} + e^{-\frac{T_0}{T_2}} \right) z \right]}{e^{-\frac{T_0}{T_3}} e^{-\frac{T_0}{T_2}} z^2 - \left( e^{-\frac{T_0}{T_3}} + e^{-\frac{T_0}{T_2}} \right) z + 1}. \quad (21)$$

**Розробка критерію вибору періоду дискретизації інформації.** Для цього задаємося значенням похибки відновлення аналогового сигналу за дискретними відліками. Вплив КС на виконуючий механізм ШВ подаємо у вигляді обмеженого ряду Фур'є, який має десять гармонійних складових:

$$v(t) = \sum_{i=1}^{10} A_{2i-1} \sin[(2i-1)\omega t]. \quad (22)$$

Втрати інформації під час дискретизації за часом гармонійного сигналу оцінюються величиною динамічної похибки, яка отримана у такому вигляді [9]:

$$\delta_{\text{дин}} = 1 - \frac{\pi}{m} \sum_{k=0}^{0.5m-1} \sin\left(k \frac{2\pi}{m}\right), \quad (23)$$

де  $m$  – кількість інтервалів дискретизації.

Відносна похибка дискретизації сигналу (22) визначена з урахуванням внесків гармонійних складових:

$$\delta_{\text{сум}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} A_{2i-1}^2}{\sum_{i=1}^n A_{2i-1}^2}} \delta_{(2i-1)\text{дин}}^2. \quad (24)$$

За допомогою цього виразу побудовано графік (див. рис. 3), який використано авторами для визначення кількості інтервалів поділу прямої або зворотної ходи круга при обраній похибці відновлення.

Час виконання одного проходу залежить від довжини заготівлі та повздовжньої подачі ШК. Тому цей час можливо встановити заздалегідь. Період дискретизації вхідного сигналу обчислюємо шляхом поділу часу виконання одного проходу на задану кількість інтервалів.



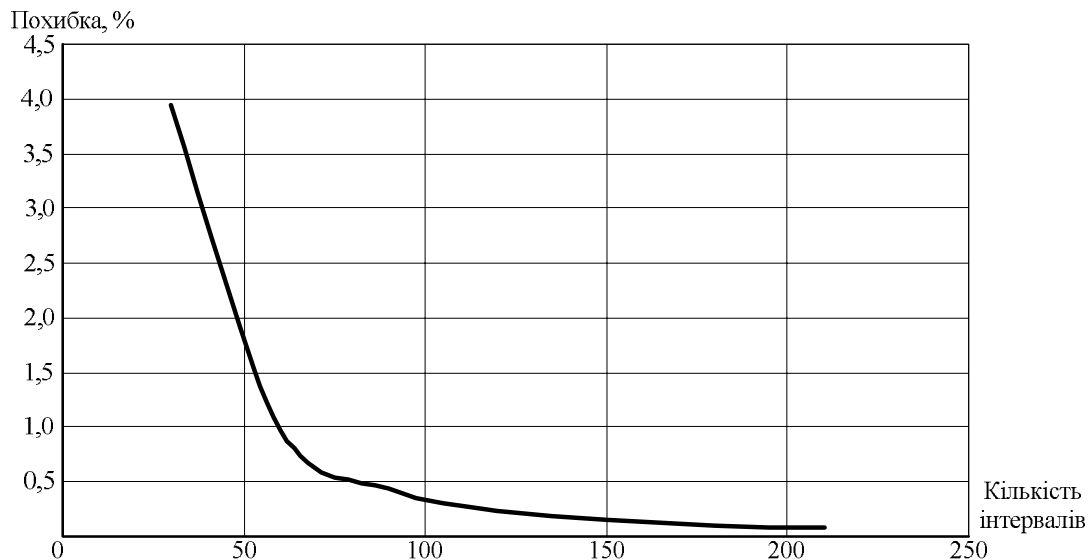


Рисунок 3 – Графік похибок дискретизації

Продуктивність апаратних засобів КС при обробці вхідної інформації не повинна перевищувати розрахований період дискретизації. Так, наприклад, час одного проходу ШК заготовлі довжиною 0,5 м, при повздовжній подачі 4,0 м/хв. складає 7,5 с. Для випадку, коли похибка дискретизації аналогового сигналу складає 0,035, відповідно з цим, результати розрахунків дають 100 інтервалів. Звідси, час обробки апаратними засобами вхідного сигналу складає 0,075 с. Цей час і є критерієм для оцінювання можливої продуктивності апаратних засобів КС.

### Висновки.

Розроблено концепцію програмного керування КС рухами апаратних засобів щодо скорочення циклу обробки деталі та забезпеченню прогнозованих мікронерівностей її обробленої поверхні. Архітектуру тривимірної триступеневої КС побудовано з використанням ієрархічного принципу, методів безпосереднього цифрового управління та управління зі зворотнім зв'язком по стану, а також непрямого контролю амплітуди мікронерівностей поверхні деталі, яка оброблюється, на основі вимірювань сигналу миттєвої швидкості обертання ШК. На основі дискретного перетворення Лапласа побудовано детерміновані математичні моделі апаратних засобів КС. При їхній розробці враховано запізнення та дія випадкових завад. Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням еталонних моделей синтезовано потрібні апаратні засоби цифрової обробки сигналів. На основі частотного подання вхідного сигналу розроблено критерій вибору періоду дискретизації.

### Перелік використаної літератури

1. Еникеев, А.Ф. Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования / А.Ф. Еникеев. – Краматорск: ДГМА, 2001. – 160 с.
2. Єнікеев, О.Ф. Аналіз динамічних характеристик системи стабілізації швидкості обертання круга / О.Ф. Єнікеев, О.В. Суботін, Р.О. Яровий // «Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем». – Краматорськ, 2005. – Вып.18. – С. 107 – 113.
3. Еникеев, А.Ф. Синтез цифрового регулятора поперечної передачі шліфувального круга / А.Ф. Еникеев, И.С. Зыков // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Х., 2008. – №57. – С. 87 – 93.
4. Борисенко, А.М. Аналіз динаміки дворівневої системи підвищення ефективності алмазного шліфування / А.М. Борисенко, О.Ф. Єнікеев, И.С. Зыков // Вісник Національного технічного університету «ХПИ» «Математичне моделювання в техніці та

- технологіях». – Харків, 2012. – № 2. – С. 34 – 43.
5. Єнікеєв, О.Ф. Адаптивна система цифрового управління технологічним процесом алмазного шліфування з еталонною моделлю / О.Ф. Єнікеєв, О.В. Суботін // «Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем». – Краматорськ, 2008. – Вып.23. – С. 307 – 314.
  6. Єнікеєв, О.Ф. Аналіз динамічних характеристик системи відновлення ріжучої здатності шліфувальних кругів / О.Ф. Єнікеєв, Г.В. Соколовська // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ІПМЕ НАН України. – 2011. – Вып.58. – С. 135 – 140.
  7. Єнікеєв, О.Ф. Оптимальний цифровий регулятор привода обертання шліфувального круга / О.Ф. Єнікеєв, Ф.М. Євсюкова, І.С. Зиков, Л.О. Шищенко // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2007. – №17. – С. 91 – 98.
  8. Єнікеєв, О.Ф. Реалізація непрямих вимірювань мікронерівностей деталей для підвищення ефективності алмазного шліфування / О.Ф. Єнікеєв, Г.В. Соколовська, Т.Л. Щербак // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ІПМЕ НАН України. – 2012. – Вып. 62. – С. 41 – 48.
  9. Єнікеєв, О.Ф. Комп'ютерна система підвищення ефективності алмазного шліфування в умовах неповної інформації / О.Ф. Єнікеєв // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. Міжнародний науково-технічний журнал ВНТУ. – 2014. – № 2. – С. 40 – 49.
  10. Єнікеєв, О.Ф. Комп'ютерна система управління алмазним шліфуванням в умовах неповної інформації / О.Ф. Єнікеєв // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – №6. – С.15 – 24.

#### References

1. Enikeev, A.F. (2001), *Optimal'noe upravlenie tehnologicheskim processom almaznogo shlifovaniya* [Optimum process control diamond grinding], DSMA, Kramatorsk, Ukraine.
2. Yenikyeyev, O.F., Subotin, O.V. and Yarovyuy R.O. (2005), «Analysis of dynamic characteristics of the system stabilize rotation speed Lock wheel», *«Nadiynist' instrumentu ta optymizatsiya tekhnolohichnykh system».*, № 18, pp. 107 - 113.
3. Enikeev, A.F. and Zykov, I.S. (2008), «Synthesis of the digital regulator of the transverse gear of the shlifovalnogo circle», *Visnik Nacional'nogo tekhnichnogo universitetu «KhPI».*, №57. pp. 87 - 93.
4. Borisenko, A.N., Enikeev, A.F. and Zykov, I.S. (2012), «The analysis of the two-tier system efficiency of diamond polishing», *Visnik Nacional'nogo tekhnichnogo universitetu «KhPI» «Matematichne modelyuvannya v tekhnici ta tekhnologiyah».*, № 2, pp. 34 – 43.
5. Yenikyeyev, O.F. and Subotin, O.V. (2008), «Adaptive digital process control diamond grinding with the standard model», *«Nadiynist' instrumentu ta optymizatsiya tekhnolohichnykh system».*, №23, pp. 307 - 314.
6. Yenikyeyev O.F., and Sokolovska G.V. (2011) «Analysis of dynamic characteristics of the system recovery ability of cutting grinding wheels», *«Modelyuvannya ta informatsiyini tekhnolohiyi».* Zbirnik naukovih prac' IPME NAN Ukraini., №58. pp. 135 - 140.
7. Yenikyeyev, O.F., Evsukova, F.M., Zykov, I.S. and Shyshenko, L.A. (2007), «Optimum digital control drive rotation of the grinding wheel», *Visnik Nacional'nogo tekhnichnogo universitetu «KhPI».*, № 17, pp. 91 – 98.
8. Enikeev, A.F., Sokolovskaya G.V. and TL Shcherbakov T.L. (2012), «Implementation indirect measurements of microscopic detail to improve the efficiency of diamond grinding», *«Modelyuvannya ta informacijni tekhnologii».* Zbirnik naukovih prac' IPME NAN Ukraini., № 62, pp. 41 – 48.
9. Enikeev, A.F. (2014), «Computer system efficiency diamond grinding under conditions of incomplete information», *«Informacijni tekhnologii ta komp'yuterna inzheneriya».*

*Mizhnarodnij naukovo-tekhnichnij zhurnal VNTU.*, № 2, pp. 40 – 49.

10. Enikeev, A.F. (2014), «Computer Control diamond grinding under conditions of incomplete information», *Visnik Vinnic'kogo politekhnichnogo institutu.*, № 6, pp.15 – 24.

Поступила до редакції:  
22.05.2017

Рецензент:  
д-р техн. наук, доц. О.В. Вовна

**А.Ф. Еникеев, О.В. Субботин, А.В. Разживин**  
*Донбасская государственная машиностроительная академия,*  
**И.Б. Абрамская**

*Украинский государственный университет железнодорожного транспорта*

**Компьютерная система программного управления процессом алмазного шлифования.** Разработана концепция программного управления движениями аппаратных средств по сокращению цикла обработки детали и обеспечению прогнозируемых микронеровностей поверхности. Построена архитектура трехмерной трехступенчатой компьютерной системы с использованием иерархического принципа, методов непосредственного цифрового управления и управления с обратной связью по состоянию, а также косвенного контроля амплитуды микронеровностей поверхности детали. Разработаны детерминированные математические модели аппаратных средств системы с учетом запаздывания и действия случайных помех. Минимизацией квадратичного критерия качества с использованием эталонных моделей синтезированы аппаратные средства цифровой обработки сигналов. На основе частотного представления входного сигнала разработан критерий выбора периода дискретизации.

**Ключевые слова:** алмазное шлифование, аппаратные средства, преобразования, микронеровности, компьютерная система.

**O. Yenikieiev, O. Subotin, A. Razzhivin**  
*Donbass State Engineering Academy,*  
**I. Abramsky**

*Ukrainian State University of Railway Transport*

**Computer system of software management process of diamond grinding.** The disadvantage of the known systems for program control of the diamond grinding process is the absence of a feedback signal about the current state of the surface quality of the part machined by the grinding machine. The construction of closed computer systems with feedback on the state of microroughness is impossible in connection with the absence of appropriate primary converters. The increase in the efficiency of diamond grinding processes is also achieved through the use of a hardware system for periodically adjusting the circle in order to periodically restore its cutting ability. The purpose of the research is to develop information technology to improve the efficiency of the diamond grinding process. It is proposed to use deviations in the speed of rotation of the grinding wheel as an input signal for estimating the microroughness of the surface of a workpiece, which is machined by a machine tool. The reference levels of deviations are determined on the basis of the qualifications of purity and are entered in the data bank of the computer system in the form of standards. Deviation is a feedback signal that contains information about the deviation of the predicted purity grade established by the batch processing program. The basis for the development of hardware is based on indirect methods for assessing the cutting ability of the grinding wheel and the construction of a new technological cycle for machining the surface of the workpiece. The concept of software control of the movement of hardware to reduce the cycle of processing parts and provide predictable microroughness of the surface. The architecture of a three-dimensional three-stage computer system is constructed using the hierarchical principle, direct digital control and control

methods with state feedback, as well as indirect control of the microroughness amplitude of the part surface. The deterministic mathematical models of the hardware of the system are developed taking into account the delay and the effect of random interference. By minimizing the quadratic quality criterion using reference models, the hardware of digital signal processing is synthesized. Based on the frequency representation of the input signal, a criterion for selecting the sampling period has been developed.

**Key words:** diamond grinding, hardware, transformation, microroughness, computer system.



**Снікєєв Олександр Фанилович**, Україна, закінчив Харківський політехнічний інститут, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри автоматизації виробничих процесів Донбаської державної машинобудівної академії (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).

Основний напрямок наукової діяльності – розробка інформаційно-вимірювальних систем автоматизації технологічних процесів алмазного шліфування, розробка апаратних засобів для контролю та діагностування технічного стану тепловозних дизель-генераторів постійного струму.



**Суботін Олег Володимирович**, Україна, закінчив Донбаську державну машинобудівну академію, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Донбаської державної машинобудівної академії (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).

Основний напрямок наукової діяльності – розробка і дослідження систем автоматизованого управління технологічними процесами в металургії і машинобудуванні, розробка інформаційно-вимірювальних систем контролю технологічних параметрів виробничих процесів.



**Разживін Олексій Валерійович**, Україна, закінчив Донбаську державну машинобудівну академію, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Донбаської державної машинобудівної академії (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).

Основний напрямок наукової діяльності – розробка і дослідження систем автоматизованого управління технологічними процесами в металургії та машинобудуванні, розробка систем керування технологічними процесами на базі ПЛК.



**Абрамска Інна Богданівна**, Україна, закінчила Горлівський інститут іноземних мов, старший викладач кафедри іноземних мов Українського державного університету залізничного транспорту (пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна).

Основний напрямок наукової діяльності – розробка автоматизованих систем управління технологічними процесами в машинобудуванні, розробка апаратних засобів для контролю та діагностування технічного стану тепловозних дизель-генераторів постійного струму.