



УДК 681.518.3

Єнікєєв О. Ф., Суботін О. В., Яровий Р. О.

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ

Недоліком систем програмного управління процесом алмазного шліфування є відсутність сигналу зворотного зв'язку про поточний стан якості поверхні деталі, що оброблюється. Побудова замкнених систем зі зворотнім зв'язком по стану мікронерівностей неможлива у зв'язку з відсутністю відповідних первинних перетворювачів. Використання комп'ютерною системою засобів для періодичної правки круга для відновлення його ріжучої спроможності підвищує ефективність процесів алмазного шліфування [1–3].

Авторами пропонується використання девіацій швидкості обертання шліфувального круга в якості вхідного сигналу для оцінювання мікронерівностей поверхні деталі, яка оброблюється верстатом. Еталонні рівні девіацій визначено на основі квалітетів чистоти та внесено до банку даних каналу зворотного зв'язку 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 у якості методу автоматичної правки шліфувального круга на металевому зв'язуванні. Технічна реалізація апаратних засобів системи будується на непрямих методах для вірогідного оцінювання ріжучої спроможності шліфувального круга та побудові нового технологічного циклу обробки деталі.

Мета роботи – розробка нової інформаційної системи для підвищення ефективності процесу алмазного шліфування. При розробці архітектури системи (рис. 1) застосовані: ієрархічний принцип; непрямий контроль мікронерівностей; принципи управління зі зворотнім зв'язком по стану, покоординатного управління, безпосереднього цифрового управління та управління за відхиленням.

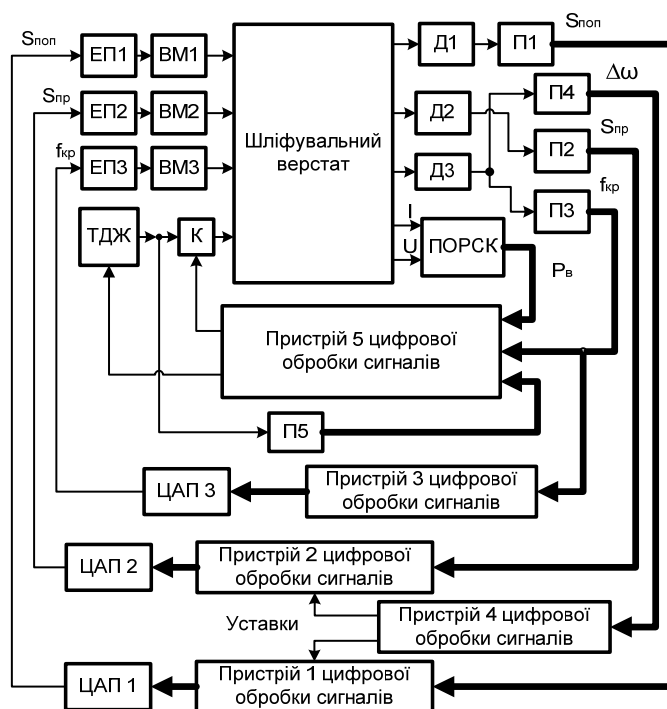


Рис. 1. Архітектура тривірневої комп'ютерної системи для підвищення ефективності процесу алмазного шліфування

На рис. 1 позначено: ЕП – електричний привод; ВМ – виконуючий механізм верстату; Д – первинний перетворювач; П – перетворювач вихідного сигналу Д у цифровий код; ЦАП – цифро аналоговий перетворювач; ПОРСК – пристрій для статистичного оцінювання ріжучої спроможності круга; ТДЖ – технологічне джерело живлення для організації періодичної правки круга на металевому зв'язуванні; К – комутатор сигналів; П5 – вимірювач параметрів вихідного сигналу ТДЖ;  $S_{\text{поп}}$ ,  $S_{\text{пр}}$  – відповідно поперечна та повздовжня подачі круга;  $f_{\text{кр}}$  – середня швидкість обертання круга;  $\Delta\omega$  – девіації;  $I$ ,  $U$ ,  $P_v$  – відповідно струм, напруга та потужність приводу обертання шліфувального круга. Технічну реалізацію пристроїв цифрової обробки сигналів виконано на базі мікроконтролерів.

Перший рівень системи реалізує задачі традиційної технології управління процесом алмазного шліфування (завдання та підтримка встановлених значень подач і середньої швидкості обертання круга). Впливи на виконуючі механізми верстату формуються ним під час прямої та зворотної ходи шліфувального круга. Технічну реалізацію апаратних засобів проведено на основі вимог по швидкодії перетворення, а також з урахуванням технологічних особливостей верстатів. У роботі [1] встановлено, що в цьому випадку сигнал девіацій є результатом дії сили різання матеріалу заготівлі і може бути застосованим системою для непрямого оцінювання мікронерівностей; покоординатні впливи на виконуючі механізми шліфувального верстату формуються пристроями (1 і 2) цифрової обробки сигналів з урахуванням корегуючих уставок каналу зворотного зв'язку.

Другий рівень системи на основі непрямих вимірюваннях мікронерівностей поверхні деталі реалізує принцип управління зі зворотнім зв'язком за станом. Пристрій 4 шляхом вимірювань миттєвої швидкості обертання шліфувального круга та за допомогою інформаційної технології обробки цього сигналу визначає прогнозовані мікронерівності шляхом: виділення сигналу девіацій та подання його обмеженим рядом Фур'є; визначення діючого значення та його порівняння з еталонними рівнями банку даних. Якщо діюче значення сигналу девіацій перевищує встановлений програмою, то пристрій 4 корегує величини подач. Покоординатні впливи на пристрої 1 та 2 цифрової обробки сигналів у вигляді корегуючих уставок подаються під час пауз між прямою та зворотною ходою круга.

Третій рівень системи реалізує періодичну правку шліфувального круга з метою відновлення його ріжучої спроможності. Відсутність первинних перетворювачів безпосереднього контролю ріжучої здатності круга компенсуємо застосуванням непрямих методів: по збільшенню на 5 % потужності приводу обертання шліфувального круга; по зменшенню на 7 % середньої швидкості обертання алмазного інструменту.

Ці рівні порогів встановлено в результаті статистичної обробки експериментальних даних [1]. Якщо вхідні сигнали каналу повертаються до встановлених для них меж, то пристрій 5 повертає верстат до процесу алмазного шліфування. При процесі алмазно-іскрового шліфування має місце підвищений знос алмазного інструменту і, отже, він економічно не вигідний. Наявність у складі апаратних засобів третього рівня комп'ютерної системи мікроконтролеру (пристрій 5 цифрової обробки сигналів) дозволяє організувати регулювання електричних параметрів технологічного процесу алмазно-іскрового шліфування, метою якого є усунення можливих припікань обробленої поверхні деталі.

*Модельовання елементів системи.* Методика аналізу лінійних апаратних засобів системи полягає у наступному: моделюємо апаратні засоби з урахуванням полоси нечутливості первинного перетворювача, яку визначаємо у результаті статистичної обробки експериментальних даних; будуємо модель апаратних засобів у вигляді передатних функцій за управляючим впливом; моделюємо збурюючий вплив; мінімізацією квадратичного критерію якості визначаємо передатну функцію пристрою цифрової обробки сигналів; на основі частотного подання вхідного впливу з використанням теореми про згортку отримуємо вихідний сигнал апаратних засобів; будуємо імітаційні моделі.

З досліджень  $z$ -перетворення передатної функції апаратних засобів для підтримки постійної швидкості обертання шліфувального круга отримано в такому вигляді [2]:

$$W_2(z) = \frac{\Delta_n k_\partial (c_1 + c_2 z^{-1}) z^{-1}}{\begin{pmatrix} 1 - e^{-\frac{T_0}{T_{14}}} z^{-1} \\ 1 - e^{-\frac{T_0}{T_{15}}} z^{-1} \end{pmatrix}}; \quad c_1 = 1 + \frac{T_{15} e^{-\frac{T_0}{T_{15}}} - T_{14} e^{-\frac{T_0}{T_{14}}}}{T_{14} - T_{15}};$$

$$c_2 = e^{-\frac{T_0}{T_{14}}} e^{-\frac{T_0}{T_{15}}} + \frac{T_{15} e^{-\frac{T_0}{T_{15}}} - T_{14} e^{-\frac{T_0}{T_{14}}}}{T_{14} - T_{15}}, \quad (1)$$

де  $\Delta_n$  – довірчий інтервал вимірювань швидкості обертання круга первинним перетворювачем, отриманий у результаті статистичної обробки експериментальних даних.

Отримана передатна функція пристрою з цифрової обробки сигналу швидкості [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 для завдання поперечної подачі шліфувального круга.  $Z$ -перетворення виразів для передатних функцій за управляючим та збурювальним впливами [3]:

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

В цих виразах врахована зона нечутливості первинного перетворювача, яку визначено на основі інформаційного підходу у результаті статистичної обробки експериментальних даних.

При визначенні сигналу завдання враховано таке: під час прямої та зворотної ходи шліфувального круга фаза вихідного сигналу змінюється на  $180^\circ$ ; пряма та зворотна хода круга утворюють період основної гармоніки частотного подання вхідного впливу. Тоді [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 шліфувального круга з поверхнею деталі.

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:

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

Розв'язування задачі Коші для диференціальних рівнянь, виконаємо з використанням теореми про згортку, а після застосування зворотного перетворення Лапласу маємо:

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

$$\text{де } B_{33} = \frac{b_1 \zeta}{T_{33}(1-\zeta^2)(\zeta T_{33} - T_{34})}; \quad B_{34} = \frac{b_1 \zeta^2}{T_{33}(1-\zeta^2)(\zeta T_{34} - T_{33})};$$

$$B_{35} = \frac{b_1 \zeta}{(\zeta T_{34} - 1)(\zeta T_{33} - T_{34})}; \quad b_1 = k_M T_{k1}^2 k_{II} \tau_r;$$

$T_{k1}$  – постійна часу ланки, яка корегує амплітудно-частотну характеристику каналу.

За допомогою теореми про згортку на основі виразів (6) та (7) отримали вихідний сигнал апаратних засобів для завдання поперечної подачі шліфувального круга:

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

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

$$W_{II1}(z^{-1}) = 767.113 \frac{2.3 - 3.453z^{-1} + 1.33z^{-2}}{0.262 + 0.008z^{-1} + 0.2182z^{-2}}. \quad (9)$$

Отримано наступні вирази для передатних функцій за управляючим та збурювальним впливами [4] апаратних засобів для завдання поздовжньої подачі алмазного інструменту:

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

У цих виразах враховано запізнювання, яке вносять пристрої П2, екстраполятор та ЕП2. Також враховано зону нечутливості первинного перетворювача.

При поданні вхідного впливу для завдання повздовжньої подачі шліфувального круга авторами 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 круга та математичних перетворень маємо:

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

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

За допомогою теореми про згортку на основі виразів (11) та (12) отримали вихідний сигнал апаратних засобів для завдання повздовжньої подачі круга:

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

Отримана передатна функція пристрою 2 цифрової обробки сигналу повздовжньої подачі шліфувального круга в такому вигляді [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 зворотного зв'язку системи із застосуванням імітаційного 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 цьому виразі враховано запізнення та похибка вимірювань девіацій.

Подасмо вхідний вплив апаратних засобів зворотного зв'язку 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 каналу зворотного зв'язку та перетворень отримали таке:

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

$$\text{де } B_{39} = \frac{\Delta_5 k_{\partial 3} k_{П4}}{T_{38}(T_{39} - T_{38})}; \quad B_{40} = \frac{\Delta_5 k_{\partial 3} k_{П4}}{T_{39}(T_{39} - T_{38})}; \quad T_{38} = T_{\partial 3}, \quad T_{39} = \tau_{П4};$$

$\Delta_5$  – похибка вимірювань девіацій;

$\tau_{П4}$  – запізнення, яке вносить пристрій П4 у роботу каналу зворотного зв'язку.

За допомогою теореми про згортку на основі виразів (15) та (16) отримали вихідний сигнал апаратних засобів зворотного зв'язку системи:

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

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

Отримана передатна функція пристрою 4 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 комп'ютерної системи із застосуванням математичного апарату  $z$ -перетворень маємо такий вираз для дискретної передатної функції апаратних засобів, які задають скважність сигналу ТДЖ при процесі алмазно-іскрового шліфування [6]:

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

Після застосування зворотного перетворення Лапласу до передатної функції апаратних засобів третього рівня та математичних перетворень отримали таке:

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

$$\text{де } B_{41} = \frac{K_{ТИП} T_2 (T_2 + K_{ОУ} T_{np})}{T_{17} (T_{18} - T_{17})}, \quad B_{42} = \frac{K_{ТИП} T_2 (T_2 + K_{ОУ} T_{np})}{T_{18} (T_{17} - T_{18})}.$$

Подаємо вхідний вплив апаратних засобів третього рівня системи у вигляді функції Хевісайда. На основі виразу (19) за допомогою теореми про згортку маємо 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]:

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

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

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

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

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

де  $m$  – кількість інтервалів дискретизації.

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

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

За цим виразом побудовано графік (рис. 2), який використано для визначення кількості інтервалів поділу прямої або зворотної ходи круга при обраній похибці відновлення. Період дискретизації впливу системи на виконуючий механізм верстату визначається шляхом поділу часу прямої ходи круга на визначену кількість інтервалів. Швидкодія апаратних засобів системи повинна перевищувати це значення періоду дискретизації.



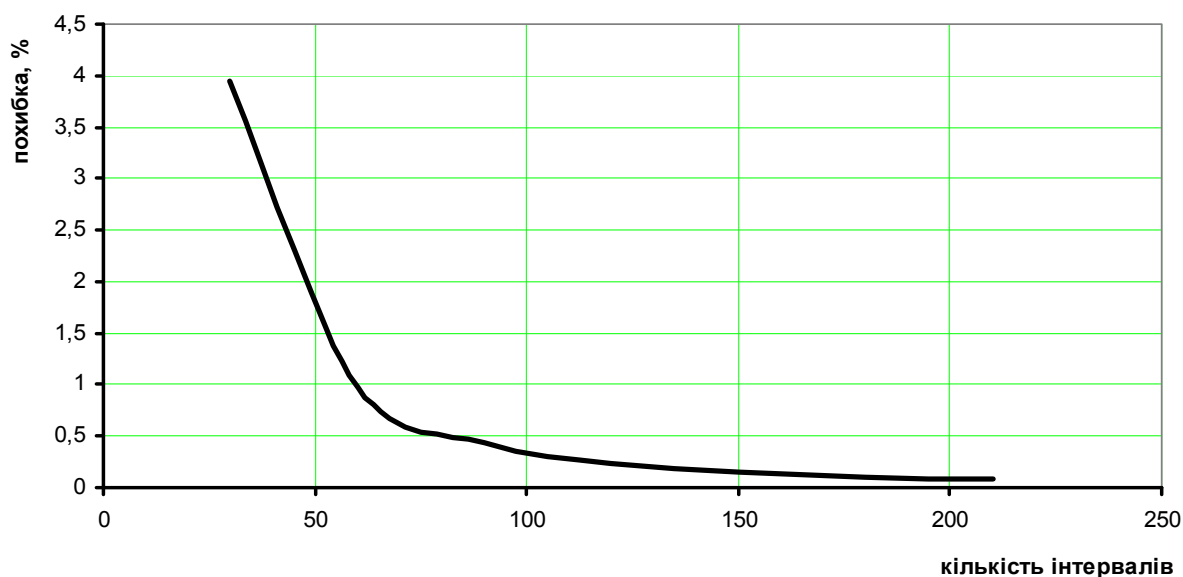


Рис. 2. Графік похибок дискретизації

## ВИСНОВКИ

З метою підвищення ефективності процесу алмазного шліфування запропоновано трирівневу комп'ютерну систему для формування покоординатних впливів на виконуючі механізми верстату. Її архітектуру 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 на основі вимірювань сигналу миттєвої швидкості обертання круга. За допомогою дискретного перетворення Лапласа побудовано моделі апаратних засобів системи в умовах дії випадкових завад і запізнення. Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням еталонних моделей синтезовано потрібні апаратні засоби цифрової обробки сигналів. Моделюванням встановлено, що вони відповідають вимогам системи за величиною похибки, швидкістю перетворення та якістю відпрацювання вхідного впливу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Еникеев А. Ф. *Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования* / А. Ф. Еникеев. – Краматорск : ДГМА, 2001. – 160 с.
2. Єнікєєв О. Ф. Аналіз динамічних характеристик системи стабілізації швидкості обертання круга / О. Ф. Єнікєєв, О. В. Суботін, Р. О. Яровий // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. пр.* – Краматорськ : ДДМА, 2005. – № 18. – С. 107–113.
3. Еникеев А. Ф. Синтез цифрового регулятора поперечной подачи шлифовального круга / А. Ф. Еникеев, И. С. Зыков // *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. – 2008. – № 57. – С. 87–93.
4. Борисенко А. М. Аналіз динаміки дворівневої системи підвищення ефективності алмазного шліфування / А. М. Борисенко, О. Ф. Єнікєєв, І. С. Зиков // *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. – 2012. – № 2. – С. 34–43.
5. Єнікєєв О. Ф. Адаптивна система цифрового управління технологічним процесом алмазного шліфування з еталонною моделлю / О. Ф. Єнікєєв, О. В. Суботін // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. пр.* – Краматорськ : ДДМА, 2008. – № 23. – С. 307–314.
6. Єнікєєв О. Ф. Аналіз динамічних характеристик системи відновлення ріжучої здатності шліфувальних кругів / О. Ф. Єнікєєв, Г. В. Соколовська // *Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. пр.* – Київ : ІПМЕ НАН України, 2011. – № 58. – С. 135–140.

Стаття надійшла до редакції 11.11.2012 р.