

течение времени, достаточного для насыщения металла азотом на глубину зоны термического влияния.

2. Наибольшая толщина и микротвердость поверхностного слоя формируются при нитроцементации, осуществляемой в последовательности ИА + ЭЭЛ углеродов (графитовым электродом).

**Список литературы:** 1. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Н.И. Лазаренко – М.: Машиностроение, 1976. – 45 с. 2. Андреев В.И. Повышение эксплуатационных характеристик рабочих поверхностей деталей / В.И. Андреев // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 1978. – №7. – С.71–72. 3. Патент України на винахід № 103701, 23Н 5/00. Спосіб зміцнення поверхонь сталевих деталей, підданих термічній обробці. / В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник / Опубл. 11.11.2013, бюл. № 21. 4. Патент України на винахід № 82948, 23С 8/00. Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням/ В.С. Марцинковский, В.Б.Тарельник, А.В. Белоус / Опубл. 25.03.2008, бюл. № 10. 5. Патент України на винахід № 101715, 23Н 9/00. Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням/ В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник, М.П. Братушак / Опубл. 25.01.2013, бюл. № 8.

**Bibliography (transliterated):** 1. Lazarenko N.I. Jelektroiskrovoe legirovanie metallicheskih poverhnošej – Moscow: Mashinostroenie, 1976. – 45 P. 2. Andreev V.I. Povyshenie jekspluatacionnyh harakteristik rabochih poverhnošej detalej. Vestnik mashinostroenija. – Moscow: Mashinostroenie, 1978. – No7. – P.71–72. 3. V.P. Marcinkovskij, V.B. Tarel'nik Patent Ukraini na vinahid No 103701, 23N 5/00. Sposib zmichenija poverhon' stalevih detalej, piddanih termicnij obrobci. Opubl. 11.11.2013, bjul. No 21. 4. V.P. Marcinkovskij, V.B.Tarel'nik, A.V. Belous Patent Ukraini na vinahid No 82948, 23S 8/00. Sposib cementacii stalevih detalej elektroerozijnim leguvannjam. Opubl. 25.03.2008, bjul. No 10. 5. V.P. Marcinkovskij, V.B. Tarel'nik, M.P. Bratushchak Patent ukraini na vinahid No 101715, 23N 9/00. Sposib cementacii stalevih detalej elektroerozijnim leguvannjam. Opubl. 25.01.2013, bjul. No 8.

*Поступила (received) 06.10.2014*

### УДК 681.518.3

**О.Ф. ЄНІКЄЄВ**, канд. техн. наук, УкрДАЗТ, Харків;

**Ф.М. ЄВСЮКОВА**, науч. сотр. НТУ «ХПИ»;

**Л.О. ШИШЕНКО**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

## **РОЗПОДІЛЕНА КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ**

На основі методів безпосереднього цифрового та покоординатного управління, ієрархічного принципу та непрямих вимірів амплітуди мікронерівностей розроблено концепцію побудови комп'ютерної системи для підвищення ефективності алмазного шліфування в умовах неповної інформації. Запропоновано метод та апаратні засоби для компенсації кінематичної похибки первинних перетворювачів миттєвої швидкості.

**Ключові слова:** концепція, архітектура, структурно-логічна організація, методи підвищення точності.

**Вступ.** Впровадження до машинобудівного виробництва України

© О.Ф. Енікєєв, Ф.М. Євсюкова, Л.О. Шищенко, 2014

сучасних інформаційних та енергозберігаючих технологій базується на розробці технічних засобів для автоматизації технологічних процесів й, зокрема, алмазного шліфування. Програмні впливи відомих систем на виконуючі механізми шліфувального верстату орієнтовано на скорочення тривалості технологічного циклу обробки деталі та отримання заданих мікронерівностей її обробленої поверхні. Архітектура відомих комп'ютерних систем не використовує сигнал стану поточних мікронерівностей, що зумовлено відсутністю відповідних первинних перетворювачів.

**Постановка завдань для досліджень.** Авторами пропонується ідея підвищення ефективності процесу алмазного шліфування в умовах неповної інформації з використанням непрямих вимірювань мікронерівностей для забезпечення заданої якості обробленої поверхні, а також у створенні нової технології обробки деталі, яка передбачає періодичну правку шліфувального круга з метою відновлення його ріжучої спроможності. Реалізація цієї ідеї можлива на основі ієрархічної розбудови архітектури комп'ютерної системи з використанням принципу безпосереднього цифрового управління виконуваними механізмами верстату та застосуванням непрямих вимірювань амплітуди мікронерівностей і ріжучої спроможності алмазного інструменту. У якості по координатних програмних впливів на верстат по досягненню поставленої мети комп'ютерна система може використати поперечну та повздовжню подачі шліфувального круга, кутові швидкості обертання алмазного інструменту та деталі.

Традиційна технологія програмного управління процесом алмазного шліфування знайшла застосування при розробці апаратних засобів першого рівня системи. Девіації швидкості обертання шліфувального круга використано у якості вхідного сигналу для апаратних засобів другого рівня при оцінюванні прогнозованих мікронерівностей поверхні деталі, яку оброблено верстатом. Інформаційно-вимірювальний канал отримає цю інформацію шляхом вимірювань миттєвої швидкості з подальшим виділенням із її часової реалізації сигналу девіацій. Еталонні рівні девіацій можна визначити на основі можливих «квалітетів» чистоти та внести до банку даних апаратних засобів у вигляді нормативів [1]. Тому девіації є джерелом непрямой інформації про фактичні мікронерівності та сигналом, який містить в собі інформацію про відхилення прогнозованого «квалітету» чистоти від встановленого програмою обробки партії деталей.

У якості методу автоматичної правки алмазного інструменту на металевому зв'язуванні можливо використання процесу алмазно-іскрового шліфування. Технічна реалізація апаратних засобів третього рівня системи будеться на пошукі непрямих методів для вірогідного оцінювання ріжучої спроможності шліфувального круга та реалізації нової технології обробки деталі.

**Інформаційне забезпечення системи.** В основу розробки нової інформаційної технології для підвищення ефективності процесу алмазного шліфування в умовах неповної інформації та дії на систему випадкових завад покладено непрямі вимірювання амплітуди мікронерівностей та ріжучої

спроможності алмазного інструменту (рис. 1).

На рис. 1 позначено:  $\Delta\omega$  – вимірювальний сигнал,  $\bar{U} = (u_1, u_2, \dots, u_i)^T$  – вектор впливів на виконуючі механізми шліфувального верстату,  $R_z$  – амплітуда мікронерівностей,  $P_e$  – вимірювальний сигнал потужності приводу головного руху верстату,  $\bar{X} = (S_{non}, S_{np}, f_{кр})^T$  – вектор стану технологічних параметрів процесу алмазного шліфування,  $\bar{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)^T$  – вектор випадкових завад,  $q_{onnt}$  – розрахункова сквапність сигналу ТДЖ,  $\bar{Q} = (\Delta_{эм}, S_{non,onnt}, S_{np,onnt}, f_{кр,onnt})^T$  – вектор уставок для виконання процесу шліфування.

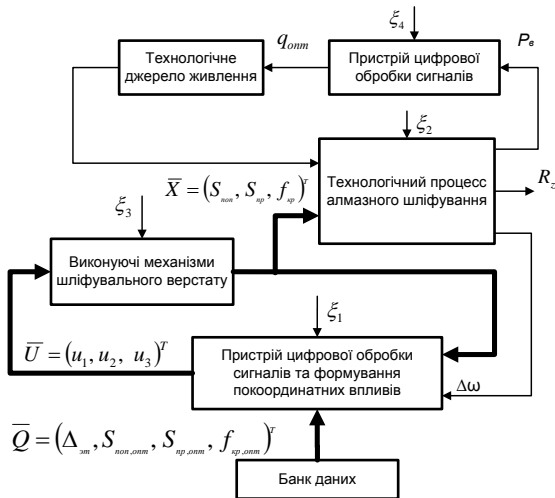


Рис. 1 – Структурна схема нової інформаційної технології для підвищення ефективності процесу алмазного шліфування в умовах неповної інформації та дії випадкових завад

Архітектура багатопроцесорної системи для підвищення ефективності процесу алмазного шліфування подана на рис. 2.

На рис. 2 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;  $S_{non}$ ,  $S_{np}$  – відповідно поперечна та повздовжня подачі круга;  $f_{кр}$  – середня швидкість обертання круга;  $I$ ,  $U$  – відповідно струм та напруга, яку споживає привод головного

руху верстату,  $Q_{вну}$  – вектор налаштувань пристроїв 1 та 2 по результатам вимірювань девіацій. Технічну реалізацію пристроїв цифрової обробки сигналів виконано на базі мікроконтролерів.

Апаратні засоби третього рівня системи реалізують періодичну правку круга. Відсутність первинних перетворювачів безпосереднього контролю ріжучої здатності круга компенсуємо застосуванням таких непрямих методів для її оцінювання:

- по збільшенню на 5% потужності, яка споживається приводом обертання шліфувального круга;
- по зменшенню на 7% середньої швидкості обертання алмазного інструменту.

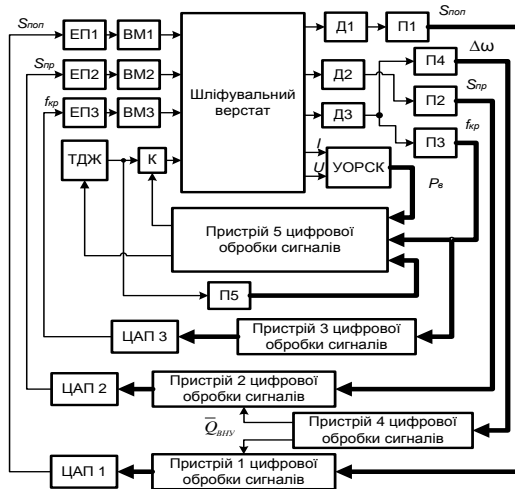


Рис. 2 – Архітектура тривірневої комп’ютерної системи для підвищення ефективності процесу алмазного шліфування на основі обробки даних непрямих вимірювань

Ці рівні порогів встановлено в результаті статистичної обробки експериментальних даних. 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 мікроконтролеру (пристрій 5 цифрової обробки сигналів) дозволяє організувати регулювання електричних параметрів технологічного процесу алмазно-іскрового шліфування, метою якого є усунення можливих припикань обробленої поверхні деталі та досягнення прогнозованих мікронерівностей.

**Моделювання елементів першого рівня.** Функціонально апаратні засоби для підтримки постійної швидкості обертання шліфувального круга побудовано на базі привода головного руху та пристрою формування цифрових впливів на нього. В результаті аналізу структурної схеми та перетворювань отримано передатну функцію приводу [2]

$$W_1(p) = \frac{K_o T_{om} P}{[(\tau_{ms} P + 1)(T_{os} P + 1)(T_{\phi} P + 1)(T_{om} P + 1) - T_{om} P](T_M P + 1)}, \quad (1)$$

де  $K_i, T_i$  – відповідно коефіцієнти передачі та постійні часу елементарних ланок математичної моделі привода.

Z-перетворення передатної функції апаратних засобів для підтримки постійної швидкості обертання шліфувального круга отримано в такому вигляді [2]

$$W_2(z) = \frac{\Delta_n k_o (c_1 + c_2 z^{-1}) z^{-1}}{\left(1 - e^{-\frac{T_0}{T_{14}}} z^{-1}\right) \left(1 - e^{-\frac{T_0}{T_{15}}} z^{-1}\right)}, \quad (2)$$

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

де  $\Delta_i$  – довірчий інтервал вимірювань швидкості обертання круга первинним перетворювачем, який отримано на основі інформаційного підходу у результаті статистичної обробки експериментальних даних.

Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням еталонної моделі каналу отримана передатна функція пристрою з цифрової обробки сигналу швидкості у такому вигляді [2]

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

На основі виразів (2) та (3) складено імітаційну модель апаратних засобів для підтримки постійної швидкості обертання круга (рис. 3).

Первинний перетворювач та виконуючий механізм вносять запізнення у роботу апаратних засобів для завдання поперечної подачі шліфувального круга. Z-перетворення виразів для передатних функцій цього каналу комп'ютерної системи за управляючим та збурювальним впливами мають такий вигляд [3]

$$W_3(z^{-1}) = z^{-2} \frac{b_0^\circ + b_1^\circ z^{-1} + b_2^\circ z^{-2} + b_3^\circ z^{-3}}{1 + a_1^\circ z^{-1} + a_2^\circ z^{-2} + a_3^\circ z^{-3}}, \quad W_4(z^{-1}) = \frac{k_M T_M (1 - l_4) z^{-1}}{1 - (1 + l_4) z^{-1} + l_4 z^{-2}}, \quad (4)$$

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

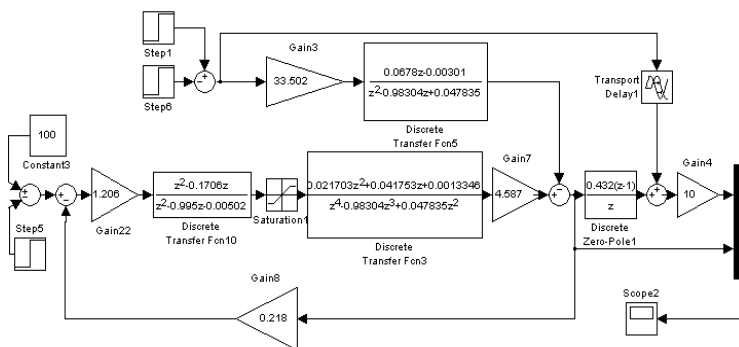


Рис. 3 – Імітаційна модель апаратних засобів для підтримки постійної швидкості обертання шліфувального круга

При визначенні вхідного сигналу апаратних засобів для завдання поперечної подачі круга авторами 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.

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

$$S_{non}(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } -\pi < \Omega t < -\pi + \alpha, -\alpha < \Omega t < \alpha, \pi - \alpha < \Omega t < \pi, \\ S_{non}, & \text{якщо } \alpha < \Omega t < \pi - \alpha, \\ -S_{non}, & \text{якщо } -\pi + \alpha < \Omega t < -\alpha, \alpha > 0, 0 < \alpha < 0.5\pi, \end{cases} \quad (5)$$

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

Перетворення Фур'є для сигналу (5) має наступний вигляд

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

Після заміни гармонійних складових сумою експоненціальних сигналів та перетворень маємо

$$S_{non}(t) = \sum_{k=1}^n \frac{4S_{non}}{\pi(2k-1)} \cos\left[\frac{(2k-1)\Omega}{2}(t_1 - t_2)\right] \{e^{j[(2k-1)\Omega t - 0.5\pi]} - e^{-j[(2k-1)\Omega t - 0.5\pi]}\}. \quad (7)$$

Розв'язування задачі Коші для диференціальних рівнянь, які описують процес перетворення вхідної інформації каналом для завдання поперечної подачі круга, виконаємо з використанням теореми про згортку. Після застосування зворотного перетворення Лапласу до передатної функції каналу та математичних перетворень отримали таке

$$W_5(t) = \sum_{k=1}^4 B_k e^{-p_k t}, \quad (8)$$

$$\text{де } B_k = \frac{b_0^* \tau_r (\tau_4 p + 1)}{4a_4 p^3 + 3a_3 p^2 + 2a_2 p + a_1} \Big|_{p=p_k}.$$

За допомогою теореми про згортку на основі виразів (7) та (8) після математичних перетворень отримали вихідний сигнал апаратних засобів для програмного завдання поперечної подачі шліфувального круга у такому вигляді

$$y_{non}(t) = \sum_{k=1}^4 B_k e^{-p_k t} \sum_{i=1}^n \frac{2A_{2i-1} T_k}{\sqrt{1 + T_k^2 (2i-1)^2 \Omega^2}} e^{j[0.5\pi - \arctg T_k (2i-1)\Omega]}$$

Пристрій 1 цифрової обробки сигналу поперечної подачі розроблено методом мінімізації квадратичного критерію якості з використанням еталонної моделі каналу. На основі виразу (6) отримана передатна функція пристрою 1 у такому вигляді [3]

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

На основі виразів (4) та (9) складено імітаційну модель апаратних засобів для завдання поперечної подачі круга (рис. 4).

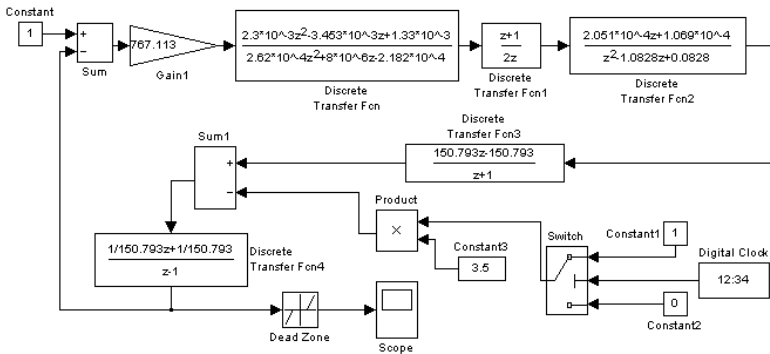


Рис. 4 – Імітаційна модель апаратних засобів для завдання поперечної подачі круга

У результаті аналізу структурної схеми каналу для завдання поздовжньої подачі алмазного інструменту із застосуванням імітаційного моделювання та апарата z-перетворень отримано наступні вирази для передатних функцій за управляючим та збурювальним впливами [4]

$$W_5(z^{-1}) = z^{-2} \frac{b_0^* + b_1^* z^{-1} + b_2^* z^{-2} + b_3^* z^{-3}}{1 + a_1^* z^{-1} + a_2^* z^{-2} + a_3^* z^{-3}}, \quad W_6(z^{-1}) = \frac{k_j z^{-1} [1 - T_j + (T_j - L_4) z^{-1}]}{1 - (1 + L_4) z^{-1} + L_4 z^{-2}}. \quad (10)$$

У цих виразах враховано запізнювання, яке вносять пристрої П2, екстраполятор та ЕП2. Також враховано зону нечутливості первинного перетворювача, яку визначено на основі інформаційного підходу у результаті статистичної обробки експериментальних даних.

При поданні вхідного сигналу каналу для завдання поздовжньої подачі шліфувального круга авторами враховано те, що вона за своєю сутністю являє швидкість переміщення приводу

$$S_{np}^j(t) = \sum_{k=1}^n B_{2k-1} [e^{j(2k-1)\Omega t} + e^{-j(2k-1)\Omega t}] \text{ при } B_{2k-1} = \frac{2S_{np}}{\pi} \cos \left[ \frac{(2k-1)\Omega}{2} (t_1 - t_2) \right]. \quad (11)$$

Після застосування зворотного перетворення Лапласу до передатної функції каналу для завдання поздовжньої подачі круга та математичних перетворень отримали таке

$$W_7(t) = \sum_{k=5}^8 B_k e^{-p_k t} \text{ при } B_k = \frac{b_0^* \tau_r p (\tau_a p + 1)}{4a_4 p^3 + 3a_3 p^2 + 2a_2 p + a_1} \Big|_{p=p_k}. \quad (12)$$

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

$$y_{nd}(t) = \sum_{k=5}^8 B_k e^{-p_k t} \sum_{i=1}^n \frac{\hat{A}_{2i-1} T_k}{\sqrt{1 + T_k^2 (2i-1)^2 \Omega^2}} [e^{j \arctg T_k (2i-1) \Omega} - e^{-j \arctg T_k (2i-1) \Omega}].$$

В основу розробки пристрою 2 цифрової обробки сигналу поздовжньої подачі шліфувального круга в умовах дії випадкових завад покладено метод його синтезу з використанням еталонної моделі каналу. Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням апарату z-перетворень отримана передатна функція пристрою 2 в такому вигляді [4]

$$W_{f2}(z^{-1}) = \frac{0.04752 + 0.862z^{-1} - 0.823z^{-2}}{0.374 - 0.374z^{-1}}. \quad (13)$$

На основі виразів (10) та (13) складено імітаційну модель апаратних засобів для завдання поздовжньої подачі круга (рис. 5).

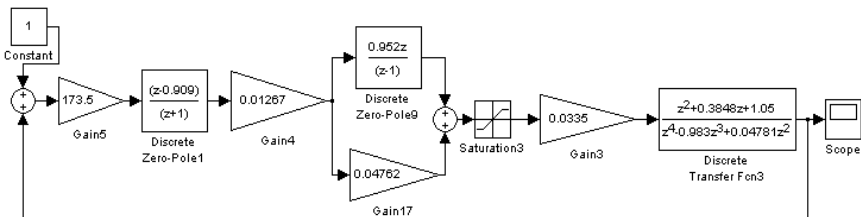


Рис. 5 – Імітаційна модель апаратних засобів для завдання поздовжньої подачі круга

### Модельовання елементів другого рівня. В результаті аналізу



структурної схеми каналу із застосуванням імітаційного моделювання та апарата z-перетворень отримано такий вираз для передатної функції [5]

$$W_8(z^{-1}) = z^{-1} \frac{b_1^* z^{-1}}{1 + a_1^* z^{-1} + a_2^* z^{-2}}. \quad (14)$$

У цьому виразі враховано запізнення каналу та похибка вимірювань девіацій, яку визначено на основі інформаційного підходу у результаті статистичної обробки експериментальних даних.

Подаємо 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 та математичних перетворень отримали таке

$$W_{33}(t) = B_9 e^{-\frac{1}{T_{16}} t} + B_{10} e^{-\frac{1}{T_{17}} t}, \quad (16)$$

де  $B_9 = \frac{\Delta_5 k_{a3} k_{\gamma 4}}{\dot{O}_{16}(T_{17} - T_{16})}$ ,  $B_{10} = \frac{\Delta_5 k_{a3} k_{\gamma 4}}{\dot{O}_{17}(T_{17} - T_{16})}$ ,  $\dot{O}_{16} = \dot{O}_{a3}$ ,  $\dot{O}_{17} = \tau_{\gamma 4}$ ,  $\Delta_5$  – похибка вимірювань девіацій,  $\tau_{\gamma 4}$  – запізнення, яке вносить пристрій П4 у роботу каналу.

За допомогою теореми про згортку на основі виразів (15) та (16) отримали вихідний сигнал апаратних засобів

$$y_{oc}(t) = B_9 e^{-\frac{1}{T_{16}} t} \sum_{k=1}^{10} \frac{A_k T_{16}}{\sqrt{1 + T_{16}^2 k^2 \Omega^2}} \left[ e^{j(\psi_k + 0.5\pi - \arctg T_{16} k \Omega)} - e^{-j(\psi_k + 0.5\pi + \arctg T_{16} k \Omega)} \right] +$$

$$+ B_{10} e^{-\frac{1}{T_{17}} t} \sum_{k=1}^n \frac{A_k T_{17}}{\sqrt{1 + T_{17}^2 k^2 \Omega^2}} \left[ e^{j(\psi_k + 0.5\pi - \arctg T_{17} k \Omega)} - e^{-j(\psi_k + 0.5\pi + \arctg T_{17} k \Omega)} \right]$$

В основу розробки пристрою 4 цифрової обробки сигналу миттєвої швидкості покладено метод його синтезу на базі еталонної моделі каналу. Мінімізацію квадратичного критерію якості з використанням математичного апарату z-перетворень отримана передатна функція пристрою 4 в такому вигляді [5]

$$W_{\gamma 4}(z^{-1}) = \frac{1.54 - 2.096z^{-1} + 0.616z^{-2}}{2.574 + 0.083z^{-1} - 2.156z^{-2}}. \quad (17)$$

На основі виразів (14) та (17) складна імітаційна модель каналу комп'ютерної системи (рис. 6).

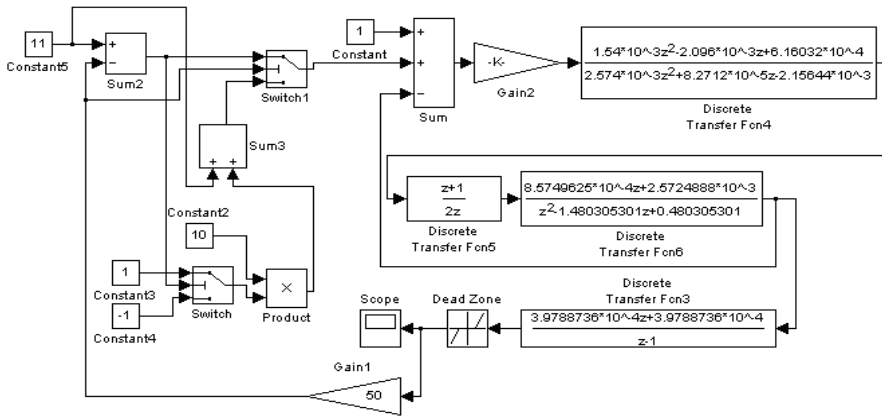


Рис. 6 – Імітаційна модель третього рівня системи

**Моделювання елементів третього рівня.** В результаті аналізу структурної схеми третього рівня із застосуванням апарату z-перетворень маємо такий вираз для дискретної передатної функції каналу, який реалізує нову технологію обробки деталі [6]

$$W_8(z) = \frac{k_{\partial \dot{E} I} T_a (T_a + K_{I\partial} T_{i\partial}) \frac{T_1}{T_3 - T_2} \left( e^{-\frac{T_0}{T_3}} + e^{-\frac{T_0}{T_2}} \right) z^{-1}}{\left( 1 - e^{-\frac{T_0}{T_2}} z^{-1} \right) \left( 1 - e^{-\frac{T_0}{T_3}} z^{-1} \right)}, \quad (18)$$

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

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

$$\text{де } B_{41} = \frac{K_{\partial \dot{E} I} T_a (T_a + K_{I\partial} T_{i\partial})}{\dot{\Delta}_{17} (T_{18} - T_{17})}, \quad B_{42} = \frac{K_{\partial \dot{E} I} T_a (T_a + K_{I\partial} T_{i\partial})}{\dot{\Delta}_{18} (T_{17} - T_{18})}.$$

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

$$y_{B3}(t) = 1(t) + \frac{B_{42} \dot{\Delta}_{18}}{\dot{\Delta}_{18} + 1} e^{-\frac{\dot{\Delta}_{18} t}{T_{18} + 1}} - \frac{B_{41} \dot{\Delta}_{17}}{\dot{\Delta}_{17} + 1} e^{-\frac{\dot{\Delta}_{17} t}{T_{17} + 1}}. \quad (20)$$

Мінімізацією квадратичного критерію якості одержали передатну функцію пристрою 5 цифрової обробки сигналів [6]

$$W_{f5}(z) = \frac{k_{\text{OËT}} T_{\bar{a}} (T_{\bar{a}} + K_{\text{IO}} T_{i\bar{o}}) \frac{\tau_r}{T_3 - T_2} \left[ z^2 + \left( e^{\frac{T_0}{T_3}} + e^{\frac{T_0}{T_2}} \right) z \right]}{e^{\frac{T_0}{T_3}} e^{\frac{T_0}{T_2}} z^2 - \left( e^{\frac{T_0}{T_3}} + e^{\frac{T_0}{T_2}} \right) z + 1}. \quad (21)$$

На основі виразів (18) та (21) складено імітаційну модель (рис. 7) каналу, який реалізує нову технологію обробки деталі.

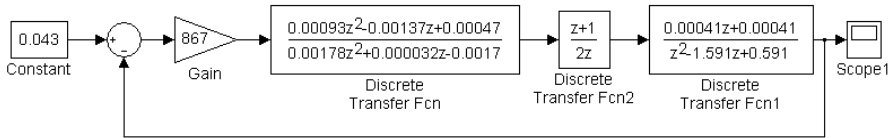


Рис. 7 – Імітаційна модель апаратних засобів третього рівня

**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

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

де  $m$  – кількість інтервалів дискретизації.

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

$$\delta_{\text{н\ddot{o}i}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n A_{2i-1}^2}{\sum_{i=1}^n A_{2i-1}^2}} \delta_{(2i-1)\text{д\ddot{e}i}}^2. \quad (24)$$

За допомогою цього виразу побудовано графік (рис. 8). Цей Рис. використано авторами для визначення кількості інтервалів дискретизації прямої або зворотної ходи круга при обраній похибці відновлення. Період дискретизації сигналу системи визначається шляхом поділу часу прямої ходи круга на визначену кількість інтервалів. Швидкодія апаратних засобів системи повинна перевищувати це значення періоду дискретизації.

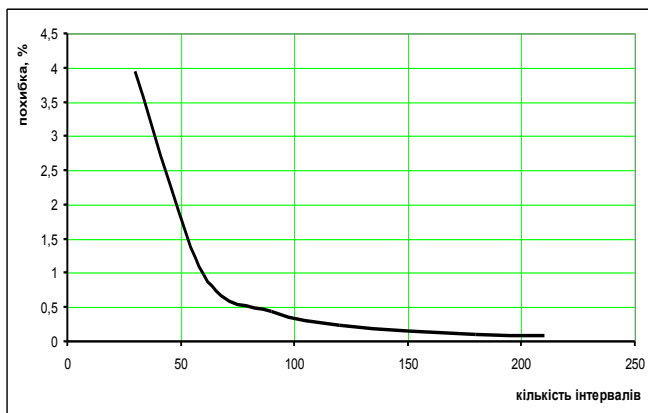


Рис. 8 – Графік похибок дискретизації

**Висновок.** З метою підвищення ефективності технологічного процесу алмазного шліфування запропоновано інформаційну технологію та розподілену комп'ютерну систему. Архітектуру системи розбудовано з використанням ієрархічного принципу, непрямих вимірювань амплітуди мікронерівностей та ріжучої спроможності круга. На основі дискретного перетворення Лапласа побудовано математичні моделі апаратних засобів багатопроцесорної системи в умовах дії випадкових завад й з урахуванням запізнення. Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням еталонних моделей синтезовано потрібні апаратні засоби цифрової обробки сигналів. Побудовано імітаційні моделі апаратних засобів комп'ютерної системи. У результаті імітаційного моделювання встановлено, що вони відповідають вимогам системи за величиною похибки та швидкістю перетворення.

**Список 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. – Краматорск, 2005. – № 18 – С. 107 – 113. 3. Єнікєєв А.Ф. Синтез цифрового регулятора поперечної передачі шліфувального круга / А.Ф. Єнікєєв, І.С. Зиков // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков, 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» «Математичне моделювання в техніці та технологіях». – Харків, 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. – Краматорск, 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. Збірник наукових праць ПІМЕ НАН України. – К.: 2011. – № 58 – С. 135 – 140.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Enikeev A.F.* Optimal'noe upravlenie tehnologicheskim procesom almaznogo shlifovaniya. – Kramatorsk: DGMA, 2001. – 160 P. 2. *Yenikyeyev O.F., Subotin O.V., Yarovyj R.O.* Analiz dy'namichny'x karaktery'styk sy'stemy` stabilizaciyi shvy'dkosti obertannya kruga. Nadijnist` instrumentu ta opy`mizaciya tehnologichny'x sy'stem. – Kramatorsk, 2005. – No 18 – P. 107 – 113. 3. *Yenikyeyev A.F., Zy'kov Y.P.* Sy'ntez cy'frovogo regulatora poperechnoyi peredachi shlifoval'nogo kruga. Vestny'k Nacy'onal'nogo texny'cheskogo uny'versy'teta «KhPI». – Kharkov, 2008. – No 57 – P. 87 – 93. 4. *Borysenko A.M., Yenikyeyev O.F., Zy'kov I.P.* Analiz dy'namiky` dvorivnevoyi sy'stemy` pidvy`shhennya efekty`vnosti almaznogo shlifuvannya. Visny'k Nacional'nogo texnichnogo univerty'setu «KhPI» «Matematy`chne modelyuvannya v texnici ta tehnologiyax». – Kharkiv, 2012. – No 2 – P. 34 – 43. 5. *Yenikyeyev O.F., Subotin O.V.* Adaptivna sy'stema cy'frovogo upravlinnya tehnologichny'm procesom almaznogo shlifuvannya z etalonnoyu modellyu. Nadijnist` instrumentu ta opy`mizaciya tehnologichny'x sy'stem. – Kramatorsk, 2008. – No 23 – P. 307 – 314. 5. *Yenikyeyev O.F., Sokolovska G.V.* Analiz dy'namichny'x karaktery'styk sy'stemy` vidnovlennya rizhuchoyi zdatnosti shlifoval'ny'x krugiv. Modelyuvannya ta informaciyi tehnologiyi. Zbirny'k naukovy'x prac' IPME NAN Ukrainy`. – Kyiv: 2011. – No 58 – P. 135 – 140.

*Надійшла (received) 06.10.2014*

**УДК 621.921**

**А.А. АНДИЛАХАЙ**, докт. техн. наук, доц., ГВУЗ “ПГТУ”, Мариуполь

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИНИШНОЙ СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ МЕЛКИХ ДЕТАЛЕЙ**

В статье разработаны обобщающие эмпирические математические модели параметров абразивной обработки деталей затопленными струями, которые позволяют по критериям наименьшей шероховатости поверхности и наибольшей производительности определить рациональные параметры обработки. Установлено, что в процессе обработки происходит скругление кромок деталей, устраняются заусенцы, следы коррозии и разные неоднородности на обрабатываемых поверхностях, образуется однородная матовая поверхность с шероховатостью в пределах  $R_a = 0,8 - 1,25$  мкм, с упрочняющим наклепом (сжимающими напряжениями глубиной 5 – 6 мкм), существенно уменьшается трудоемкость обработки.

**Ключевые слова:** абразивная обработка, абразивные зерна, мелкие детали, сжатый воздух, сопло Лавала, шероховатость поверхности, производительность обработки.

**Введение.** Струйно-абразивная обработка получила применение при обработке деталей сложной конфигурации. Однако интенсивный износ каналов сопел, через которые прокачивается абразивная суспензия, в ряде случаев ограничивает ее эффективное использование. Поэтому применительно к обработке мелких деталей (массой до 3 г) предложен метод абразивной обработки затопленными струями. Его сущность состоит в том, что через сопла прокачивается только сжатый воздух, а абразивные зерна, находящиеся в абразивной суспензии, присоединяются к струям сжатого воздуха после срезов сопел. Струи сжатого воздуха подаются таким образом, чтобы достигались обработка и равномерное перемешивание деталей, а также

© А.А. Андилахай, 2014