

Щодо відрізка CA_1 легко пересвідчитись в його належності до *дотичної* до опуклої частини кривої (2) в точці A_1 . Оскільки CA_1 є хордою еліпса (1), остаточно маємо

$$\{(a_1, a_2) | E(0, a_1, a_2) \leq 1, a_1, a_2 \geq 0\} \subset \{(a_1, a_2) | E(a_1, a_2) \leq 1, a_1, a_2 \geq 0\}.$$

Отже, доведена

Теорема. Для невід'ємних $a_1, a_2 \geq 0$

$$E(a_1, a_2) \leq E(0, a_1, a_2).$$

Висновки. Припущення про погіршення $E(a_1, a_2, \dots, a_n)$ при правому зсуві коефіцієнтів перевірено при $n = 2$ для додатних $a_1, a_2 > 0$. Випадок $n > 2$ потребує додаткових досліджень.

Список літератури: 1. *B. Dumitrescu* Posiyive Trigonometric Polynomials and Signal Processing Applications.-Springer.-2007.-245p. 2. *І.С.Белов* Про одну теорему У.Х.Янга.- ВІСНИК НТУ «ХПІ».- вип.13.-2011.- с.9-14. 3. *І.С.Белов* Про LMI- характеристики невід'ємних косинус-многочленів.- ВІСНИК НТУ «ХПІ».- вип.42.-2011.- с.15-21.4. *С.Б.Гашков* Неравенство Фейера-Егервари-Сасса для неотрицательных тригонометрических многочленов.- Математическое просвещение, сер.3, вып.90.-2005.-с.68-75.

Надійшла до редколегії 25.11.2011

УДК 681.518.3

А.М. БОРИСЕНКО, д-р техн. наук, доцент, НТУ «ХПІ»;
О.Ф. ЄНИКЄЄВ, канд. техн. наук, доцент, УкрДАЗТ, Харків;
І.С. ЗИКОВ, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПІ»

АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ДВОРІВНЕВОЇ СИСТЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ

Стаття присвячена моделюванню комп'ютерної системи підвищення ефективності технологічного процесу алмазного шліфування, архітектура якої розроблена з використанням ієрархічного принципу, методів безпосереднього цифрового та управління за відхиленням, непрямого контролю якості обробленої поверхні деталі та сигналу зворотного зв'язку про стан шорсткості у вигляді девіацій швидкості обертання шліфувального круга.

Статья посвящена моделированию компьютерной системы повышения эффективности технологического процесса алмазного шлифования, архитектура которой разработана с использованием иерархического принципа, методов непосредственного цифрового и управления по отклонению, косвенного контроля качества обработанной поверхности детали и сигнала обратной связи о состоянии шероховатости в виде девиаций скорости вращения шлифовального круга.

The article is dedicated to modeling of the computer system of the efficiency increasing of the technological process diamond polishing, which architecture is designed with using of the hierarchical principle.

ple, methods directly digital and management on deflection, indirect checking quality processed surfaces of the detail and signal to feedback about condition of the roughness the manner of deviations of the velocities of the rotation of the polishing circle.

Вступ. Побудова замкнених систем зі зворотнім зв'язком по стану мікронерівностей поверхні деталі, що оброблюється шліфувальним верстатом, неможлива у зв'язку з відсутністю первинних перетворювачів. Автори пропонують використання девіації швидкості обертання шліфувального круга в якості вхідного сигналу для оцінювання мікронерівностей [1]. Отримання заданої якості обробленої поверхні деталі, яка встановлюється виробничим завданням у вигляді відповідного квалітету чистоти, виключає брак й дає підприємству економію електричної енергії.

Концепція підвищення ефективності алмазного шліфування. Канал зворотного зв'язку системи отримує вхідну інформацію шляхом вимірювань миттєвої швидкості обертання шліфувального круга з подальшим виділенням із її часової реалізації сигналу девіацій. Еталонні рівні девіацій визначено на основі квалітетів чистоти та внесено до банку даних каналу у вигляді нормативів. Девіації є джерелом непрямої інформації про фактичні мікронерівності та сигналом зворотного зв'язку, який містить в собі інформацію про відхилення прогнозованого квалітету чистоти від встановленого програмою обробки партії деталей. У якості впливів на виконуючі механізми верстату система застосовує поперечну та повздожню подачі, а також кутову швидкість обертання шліфувального круга.

При розробці архітектури системи (рис. 1) знайшли застосування ієрархічний принцип, непрямий контроль мікронерівностей, методи управління зі зворотнім зв'язком по стану, покоординатного та безпосереднього цифрового управління з використанням мікроконтролерів.

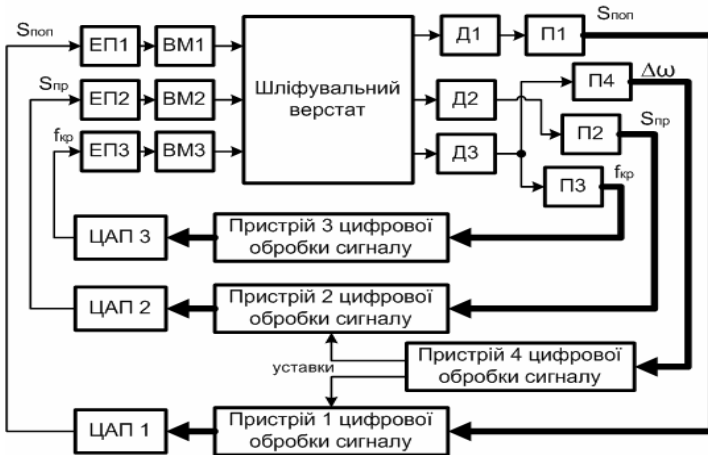


Рисунок 1 – Архітектура дворівневої комп'ютерної системи для підвищення ефективності алмазного шліфування на основі непрямого контролю мікронерівностей поверхні деталі, що оброблюється верстатом.

Перший рівень утворюють канали для завдання поперечної та повздовжньої подачі, а також середньої швидкості обертання шліфувального круга. Вони реалізують принцип управління за відхиленням поточних значень вказаних параметрів від встановлених банком даних для заданого квалітету частоти. Впливи на виконуючі механізми верстату формуються ними під час прямої та зворотної ходи алмазного інструменту. Технічну реалізацію каналів проведено на основі вимог по швидкодії перетворення, а також з урахуванням технологічних особливостей шліфувальних верстатів:

- підтримка постійної середньої швидкості обертання шліфувального круга; встановлено, що у цьому випадку сигнал девіацій є результатом дії сили різання матеріалу заготівлі і може бути застосованим комп'ютерною системою для непрямого оцінювання поточної шорсткості;
- 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 непрямого контролю мікронерівностей 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 прогнозований квалітет чистоти. Технологія обробки 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 встановлюється програмою обробки партії деталей. Якщо сигнал девіацій перевищує цей рівень, то пристрій 4 цифрової обробки сигналу миттєвої швидкості корегує величини подачі. Впливи на пристрої 1 та 2 цифрової обробки сигналів у вигляді корегуючих уставок подаються під час пауз між прямим та зворотнім ходом алмазного інструменту.

Моделювання каналів завдання подачі. В динамічному відношенні первинний перетворювач поперечної подачі шліфувального круга подаємо аперіодичним ланцюгом з запізненням та деякою смугою нечутливості (Δ_1) навколо номінальної характеристики перетворення

$$W_1(p) = \frac{\Delta_1 k_{\Pi 1} e^{-p\tau_{\Pi 1}}}{T_{\Pi 1} p + 1}, \quad (1)$$

де $k_{\Pi 1}$, $\tau_{\Pi 1}$, $T_{\Pi 1}$ – 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 статис-

тичної обробки експериментальних даних з використанням інформаційного підходу визначено закон розподілу [2]

$$f_1(x) = \frac{1}{2\sigma} e^{-\frac{|x|}{\sigma}} \text{ при } x \in (-0.12, 0.12), \text{ та похибку } \Delta_1 = \sigma e^{\frac{\mu_1}{\sigma}} = 0.05.$$

Передатну функцію екстраполятора нульового порядку подаємо у такому вигляді [3]:

$$W_2(p) = (1 - e^{-p\tau_r}) / p. \quad (2)$$

Передатна функція пристрою 1 цифрової обробки сигналу поперечної подачі як деякого довільного цифрового фільтру подається у вигляді [3]

$$W_3(p) = \frac{1}{\tau_r} (1 - e^{-p\tau_r}). \quad (3)$$

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

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

де

$$a_4 = \tau_{m\epsilon} T_{m\epsilon} T_{\mathcal{D}} T_{\mathcal{O}m} T_M,$$

$$a_3 = T_M [(\tau_{m\epsilon} + T_{m\epsilon}) T_{\mathcal{D}} T_{\mathcal{O}m} + \tau_{m\epsilon} T_{m\epsilon} (T_{\mathcal{D}} + T_{\mathcal{O}m})] + \tau_{m\epsilon} T_{m\epsilon} T_{\mathcal{D}} T_{\mathcal{O}m};$$

$$a_2 = T_M [T_{\mathcal{D}} T_{\mathcal{O}m} + \tau_{m\epsilon} T_{m\epsilon} + (\tau_{m\epsilon} + T_{m\epsilon})(T_{\mathcal{D}} + T_{\mathcal{O}m})] + (\tau_{m\epsilon} + T_{m\epsilon}) T_{\mathcal{D}} T_{\mathcal{O}m} + \tau_{m\epsilon} T_{m\epsilon} (T_{\mathcal{D}} + T_{\mathcal{O}m});$$

$$a_1 = T_M (T_{\mathcal{D}} + T_{\mathcal{O}m} + \tau_{m\epsilon} + T_{m\epsilon}) + T_{\mathcal{D}} T_{\mathcal{O}m} + \tau_{m\epsilon} T_{m\epsilon} + (\tau_{m\epsilon} + T_{m\epsilon})(T_{\mathcal{D}} + T_{\mathcal{O}m}),$$

$$a_0 = \tau_{m\epsilon} + T_{m\epsilon} + T_{\mathcal{D}} + T_{\mathcal{O}m}.$$

У результаті аналізу структурної схеми та перетворювань маємо таку передатну функцію каналу:

$$W_5(p) = \frac{k_M}{p^2 (a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0)}. \quad (5)$$

На основі аналізу полюсів виразу (5) встановлено, що канал для завдання поперечної подачі шліфувального круга без суттєвих втрат точності подається такою передатною функцією

$$W_5(p) = \frac{b_1 p}{(\zeta T_{33} p + 1) \left(\frac{T_{33}}{\zeta} p + 1 \right) (T_{34} p + 1)}. \quad (6)$$

Блоки П1, Р1 та ЕП1 вносять запізнення, яке складає $2T_0$. З урахуванням цього *z-перетворення* виразів для передатних функцій каналу за управляючим та збудувальним впливами мають такий вигляд:

$$W_6(z^{-1}) = z^{-2} \frac{b_0^\circ + b_1^\circ z^{-1} + b_2^\circ z^{-2} + b_3^\circ z^{-3}}{1 + a_1^\circ z^{-1} + a_2^\circ z^{-2} + a_3^\circ z^{-3}}, \quad W_7(z^{-1}) = \frac{k_M T_M (1 - l_4) z^{-1}}{1 - (1 + l_4) z^{-1} + l_4 z^{-2}}, \quad (7)$$

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

$$b_2^\circ = A_1(l_2 + l_3) + A_2(l_1 + l_3) + A_3(l_1 + l_2) + A_1 l_2 l_3 + A_2 l_1 l_3 + A_3 l_1 l_2;$$

$$b_3^\circ = -(A_1 l_2 l_3 + A_2 l_1 l_3 + A_3 l_1 l_2), \quad a_1^\circ = -(A_1 l_2 l_3 + A_2 l_1 l_3 + A_3 l_1 l_2),$$

$$a_2^\circ = l_2 l_3 + l_1 l_3 + l_1 l_2;$$

$$a_3^\circ = -l_1 l_2 l_3, \quad l_1 = e^{-\frac{T_0}{\zeta T_{33}}}, \quad l_2 = e^{-\frac{\zeta T_0}{T_{33}}}, \quad l_3 = e^{-\frac{T_0}{T_{34}}};$$

$$A_1 = \frac{b_1 T_{34}}{T_{33} T_{34} (\zeta^2 + 1) - \zeta (T_{33}^2 - T_{34}^2)} + \frac{b_1 \zeta}{(\zeta T_{34} - T_{33}) (1 - \zeta^2)},$$

$$A_2 = \frac{b_1 \zeta}{(\zeta T_{34} - T_{33}) (\zeta^2 - 1)}; \quad A_3 = \frac{b_1 T_{34}}{\zeta (T_{33}^2 - T_{34}^2) - T_{33} T_{34} (\zeta^2 + 1)}.$$

В основу розробки пристрою 1 цифрової обробки сигналу поперечної подачі покладено метод його синтезу з використанням еталонної моделі каналу та квадратичного критерію якості. Закон завдання каналом поперечної подачі шліфувального круга сформульовано у такому вигляді:

$$D(z^{-1}) u_t = R_1(z^{-1}) y_{m,t+d+1} - F(z^{-1}) y_t, \quad (8)$$

де $y_{m,t+d+1}$ – прогнозоване значення вихідного сигналу.

Ступеневі поліноми мають вигляд

$$R_1(z^{-1}) = \frac{\Delta_1 k_M T_M (1 - l_4)}{\varepsilon_{\text{дон}}} z^{-1}, \quad D(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2},$$

$$F(z^{-1}) = f_0 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2}.$$

Їхні коефіцієнти визначаються за допомогою наступних виразів:

$$f_0 = 1, \quad f_1 = \frac{a_1^\circ + 1}{a_1^\circ}, \quad f_2 = \frac{a_1^\circ a_2^\circ + a_1^\circ + a_2^\circ}{a_1^\circ a_2^\circ}, \quad g_0 = \frac{b_0^\circ}{a_0^\circ}, \quad g_1 = \frac{b_1^\circ - \frac{b_0^\circ a_1^\circ}{a_0^\circ} + \frac{b_0^\circ (a_1^\circ + 1)}{a_1^\circ}}{a_0^\circ},$$

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

На основі виразу (6) отримана передатна функція пристрою 1 цифрової обробки сигналу поперечної подачі шліфувального круга у вигляді [2]

$$W_{П1}(z^{-1}) = \frac{H(z^{-1})B(z^{-1})}{b_0^{\circ}A(z^{-1}) + D(z^{-1})B(z^{-1})}. \quad (9)$$

Коефіцієнти ступеневого поліному $H(z^{-1})$ мають вигляд:

$$h_0 = \frac{\Delta_1 k_M T_M (1 - l_4)}{\varepsilon_{\text{дон}}} b_0^{\circ}, \quad h_1 = \frac{\Delta_1 k_M T_M (1 - l_4) b_1^{\circ}}{\varepsilon_{\text{дон}} a_1^{\circ}}, \quad h_2 = \frac{\Delta_1 k_M T_M (1 - l_4) b_2^{\circ}}{\varepsilon_{\text{дон}} a_2^{\circ}},$$

$$h_3 = \frac{\Delta_1 k_M T_M (1 - l_4) b_3^{\circ}}{\varepsilon_{\text{дон}} a_3^{\circ}}.$$

Після підстановки коефіцієнтів та математичних перетворень виразу (9) маємо таке:

$$W_{П1}(z^{-1}) = 767.113 \frac{2.3 - 3.453z^{-1} + 1.33z^{-2}}{0.262 + 0.008z^{-1} + 0.2182z^{-2}}. \quad (10)$$

На основі виразів (7) та (10) побудована імітаційна модель каналу для завдання поперечної подачі круга (рис. 2). Поданням вхідного впливу у вигляді функції Хевісайда та імітаційним моделюванням отримано вихідний сигнал (рис. 3).

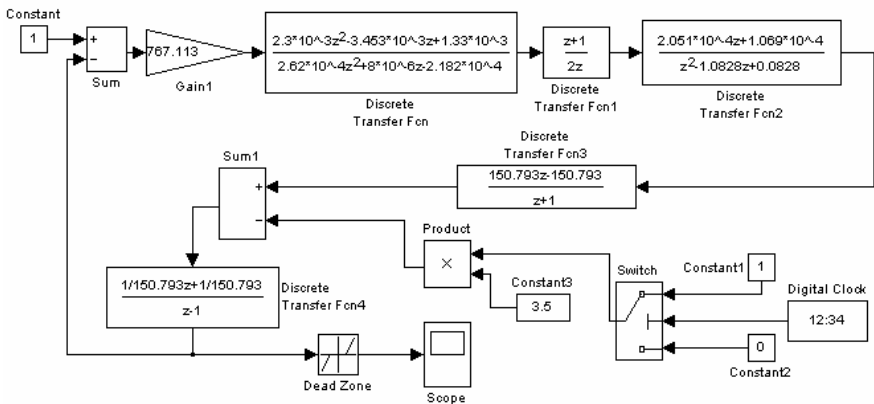


Рисунок 2 – Імітаційна модель каналу для завдання поперечної подачі.

У результаті аналізу структурної схеми каналу для завдання поперечної подачі алмазного інструменту із застосуванням імітаційного моделювання та математичного апарату z-перетворень отримано наступні вирази для передатних функцій за управляючим та збурувальним впливами:

$$W_8(z^{-1}) = z^{-2} \frac{b_0^\circ + b_1^\circ z^{-1} + b_2^\circ z^{-2} + b_3^\circ z^{-3}}{1 + a_1^\circ z^{-1} + a_2^\circ z^{-2} + a_3^\circ z^{-3}}, W_9(z^{-1}) = \frac{k_M z^{-1} [1 - T_M + (T_M - l_4) z^{-1}]}{1 - (1 + l_4) z^{-1} + l_4 z^{-2}}. \quad (11)$$

У виразах враховано запізнювання, яке вносять блоки ПІ, екстраполятор та ЕПІ.

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 отримана передатна функція пристрою 2 :

$$W_{П2}(z^{-1}) = (0.04752 + 0.862z^{-1} - 0.823z^{-2}) / (0.374 - 0.374z^{-1}). \quad (12)$$

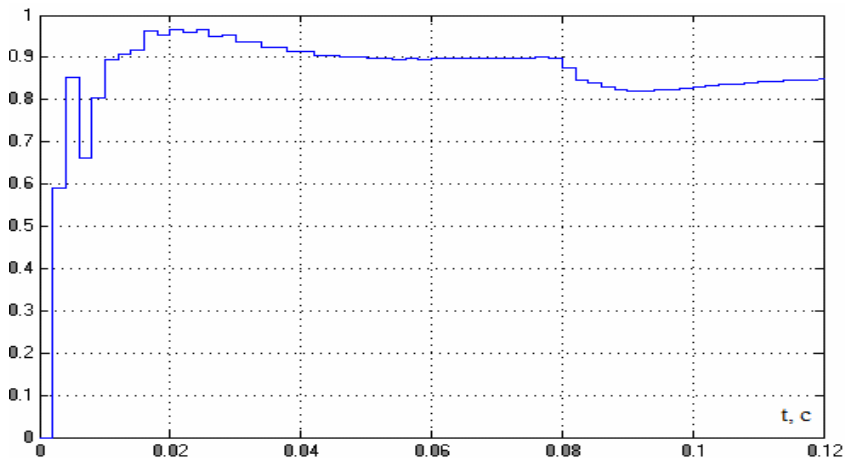


Рисунок 3 – Вихідний сигнал імітаційної моделі.

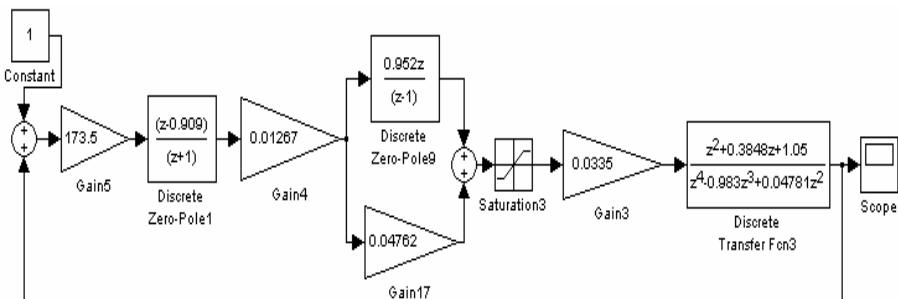


Рисунок 4 – Імітаційна модель каналу завдання поздовжньої подачі.

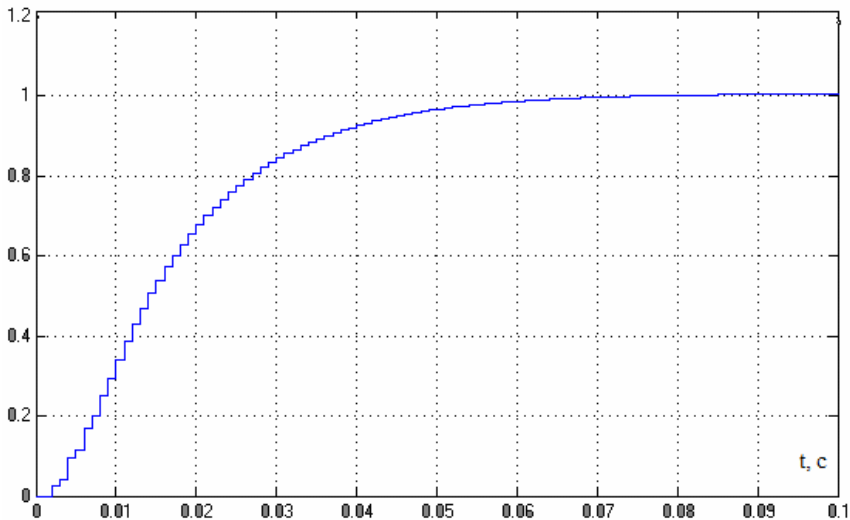


Рисунок 5 – Вихідний сигнал імітаційної моделі.

На основі виразів (11) та (12) побудована імітаційна модель каналу для завдання поздовжньої подачі шліфувального круга (рис. 4). Поданням вхідного впливу у вигляді функції Хевісайда та імітаційним моделюванням отримано вихідний сигнал (рис. 5).

Моделювання каналу зворотного зв'язку. У результаті аналізу структурної схеми каналу зворотного зв'язку із застосуванням імітаційного моделювання та апарата z -перетворень отримано вираз для передатної функції:

$$H_{K3}(z^{-1}) = z^{-1} \frac{b_1^* z^{-1}}{1 + a_1^* z^{-1} + a_2^* z^{-2}}. \quad (13)$$

У цьому виразі враховано запізнення каналу та похибка вимірювань девіацій.

В основу розробки пристрою 4 цифрової обробки сигналу миттєвої швидкості в умовах дії випадкових завод покладено метод синтезу з використанням еталонної моделі каналу зворотного зв'язку. Мінімізацією квадратичного критерію якості отримана передатна функція пристрою 4 :

$$W_{П4}(z^{-1}) = (1.54 - 2.096z^{-1} + 0.616z^{-2}) / (2.574 + 0.083z^{-1} - 2.156z^{-2}). \quad (14)$$

На основі виразів (13) і (14) складна імітаційна модель каналу зворотного зв'язку (рис. 6). Поданням вхідного впливу у вигляді функції Хевісайда та імітаційним моделюванням отримано вихідний сигнал (рис. 7).

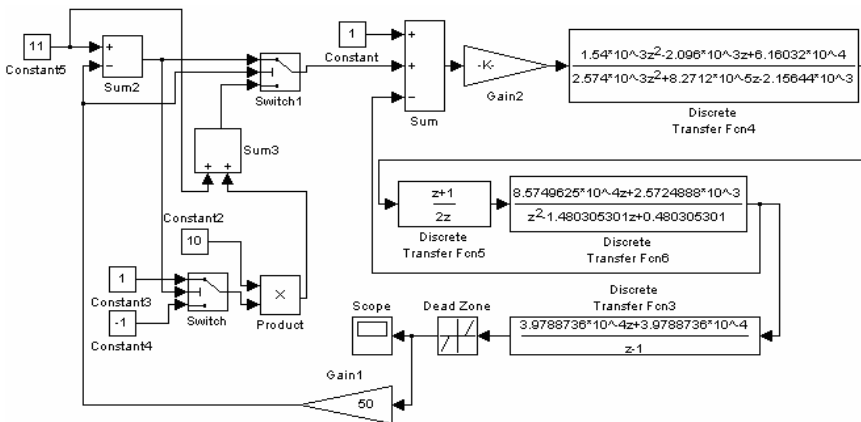


Рисунок 6 – Імітаційна модель каналу зворотного зв'язку.

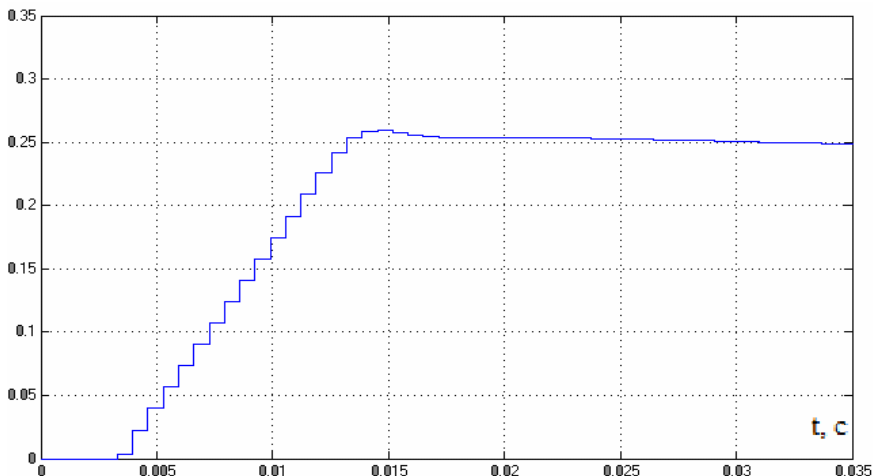


Рисунок 7 – Вихідний сигнал імітаційної моделі.

Інформаційні технології поділу внесків поперечної та поздовжньої подач до вимрювальної часової реалізації девіацій розроблено на основі частотного подання вказаних сигналів. Передатні функції внесків отримано з аналізу детермінованої математичної моделі процесу алмазного шліфування у вигляді [1]

$$W_{\text{поп}}(p) = \frac{K_n T_7 b_1 p^2}{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)(T_8 p + 1)(T_9 p + 1)},$$

$$W_{\text{пр}}(p) = \frac{K_n T_7 b_0 p}{(a_1 p + a_0)(T_8 p + 1)(T_9 p + 1)}.$$

Імітаційним моделюванням отримано графіки внесків подач до сигналу

девіацій у межах одного оберту шліфувального круга (рис. 8). Відношення діючих значень сигналів внесків до аналогічного значення сигналу девіацій дало такі значення вагових коефіцієнтів їхнього поділу

$$\gamma_{\text{поп}} = \frac{\Delta\omega_{\text{поп}}}{\Delta\omega} = 0.81 \quad \text{та} \quad \gamma_{\text{пр}} = \frac{\Delta\omega_{\text{пр}}}{\Delta\omega} = 0.586.$$

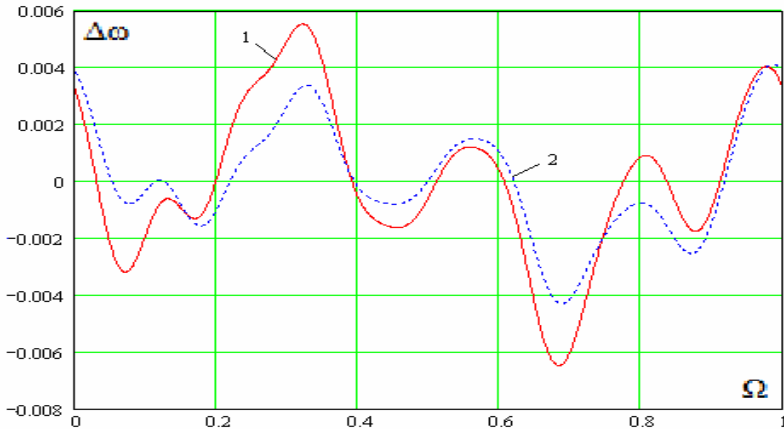


Рисунок 8 – Графіки внесків подач до сигналу девіацій:
1 – поперечної, 2 – поздовжньої.

На основі вагових коефіцієнтів поділу внесків розроблено наступний алгоритм формування каналом зворотного зв'язку уставок для відповідних пристроїв цифрової обробки сигналів:

- часову реалізацію сигналу девіацій після нормалізації його параметрів подаємо обмеженим рядом Фур'є та визначаємо діюче значення;
- нормовані значення подач одержуємо шляхом множення діючого значення сигналу девіацій на відповідний ваговий коефіцієнт;
- аналізуємо банк даних про еталонні рівні амплітуд девіацій й, якщо буде на те потреба, виконуємо коректування величин подач.

Висновки. На основі аналізу вихідних сигналів імітаційних моделей встановлено, що канали задовольняють вимогам комп'ютерної системи по швидкодії перетворення та якості відпрацювання вхідних впливів.

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

Надійшла до редколегії 25.12.2011