УДК 681.518.3

О.Ф. Єнікєєв (д-р техн. наук, доцент), І.Б. Абрамська
Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків
E-mail: al_enikeev@bigmir.net; bogdana.2013@ukr.net
О.В. Суботін (канд. техн. наук, доц.)
Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ
E-mail: o_subbotin@ukr.net

АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТНО-МОДУЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ

Розроблено математичну модель процесу алмазного шліфування зі застосуванням методу непрямих вимірювань мікронерівностей поверхні деталі. Розроблено інформаційну технологію корегування подач шліфувального круга на основі методів безпосереднього цифрового та покоординатного управління, ієрархічного принципу, непрямих вимірювань мікронерівностей та різальної властивості круга, принципів децентралізації та розпаралелювання процесів обробки вхідної інформації. На основі мінімізації квадратичного критерію якості з використанням еталонних математичних моделей апаратних засобів з відомим запізненням розроблено пристрої обробки сигналів. Розроблено інформаційно-вимірювальний пристрій, що реалізує метод апаратної компенсації кінематичної похибки.
Ключевые слова: *алмазне шліфування, пристрій, перетворення, мікронерівності, модель.*

Вступ. Підвищення економічної ефективності технологічних процесів алмазного шліфування (АШ) в умовах неповної інформації можливе при застосуванні методу непрямих вимірювань мікронерівностей поверхні деталі на основі цифрової обробки сигналу девіацій швидкості обертання круга [1, 2]. Інформаційна технологія 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 еталоном, котрий встановлено програмою обробки партії деталей. Якщо амплітуда можливих мікронерівностей перевищує рівень, який задано прийнятим «квалітетом» чистоти поверхні деталі, то обчислювальний пристрій аналізує банк даних та формує сигнали коригування подач. Як наслідок цього інформаційно-вимірювальна система (ІВС) забезпечує прогнозовану якість поверхні деталі при АШ.

Апаратні засоби цифрової обробки частотно-модульованого сигналу складають: первинний перетворювач (ПП), вимірювальний перетворювач (ВП) та обчислювальний пристрій. Метою статі є розробка ефективних апаратних засобів та аналіз їхніх метрологічних характеристик. Досягнення мети забезпечується розв'язанням таких завдань:

– математичне моделювання процесу АШ;

– розробка інформаційної технології корегування подач ШК;

– встановлення вимог щодо метрологічних характеристик вимірювального перетворювача (ВМ);

– побудова відповідних апаратних засобів та визначення їхньої ефективності.

Розробка математичної моделі процесу алмазного шліфування. Режими різання поверхні деталі задають поперечна та поздовжня подачі ШК. Тому їх застосовано у якості вхідних сигналів при розробці математичної моделі процесу АШ. За вихідний сигнал прийнята сила різання матеріалу заготівлі. З урахуванням динаміки процесу різання матеріалу заготівлі, пружних деформацій кінематичної схеми верстату та лінійного зносу алмазного інструменту отримано вираз для передатної функції [3]:

© Єнікєєв О.Ф.,Абрамська І.Б.,Суботін О.В., 2016

$$W_1(p)=\frac{K_{рез,y}\left(1-e^{-pt_1}\right)}{1+K_{рез,y}\left(1-e^{-pt_1}\right)\left[pK_y\left(\frac{p^2}{\Omega_m^2}+\frac{2\beta_m p}{\Omega_m}+1\right)+\frac{K_{ик}}{p\tau_{кр}}\left(1-e^{-p\tau_{кр}}\right)\right]}, \qquad (1)$$

де $K_{рез,y}$ – коефіцієнт передачі процесу різання матеріалу заготівлі по координаті y ($S_{поп}$), K_y – статична жорсткість конструкції верстату, β_m – коефіцієнт демпфування верстату, $K_{ик}$ – коефіцієнт зносу ШК, t_1 – час прямої або зворотної ходи ШК, $\tau_{кр}$ – час оберту ШК, Ω_m – резонансна частота конструкції верстату.

Ця передатна функція пов'язує поперечну подачу ШК із радіальною складовою сили різання. З урахуванням динаміки процесу різання матеріалу заготівлі та пружних деформацій кінематичної схеми верстата отримано такий вираз для передатної функції [4]:

$$W_2(p)=\frac{K_x K_{рез,x}\left(1-e^{-pt_1}\right)}{p\left[K_x+K_{рез,x}\left(1-e^{-pt_1}\right)\right]}, \qquad (2)$$

де $K_{рез,x}$ – коефіцієнт передачі процесу різання матеріалу заготівлі по координаті x ($S_{пр}$), K_x – статична жорсткість конструкції верстату.

Поперечну подачу ШК з урахуванням прямої та зворотної ходи подано таким сигналом (для повздовжньої подачі подання аналогічне)

$$S_{поп}(\mathrm{t})=\begin{cases}0, & \text{якщо } -\pi<\Omega\mathrm{t}<-\pi+\alpha, -\alpha<\Omega\mathrm{t}<\alpha, \pi-\alpha<\Omega\mathrm{t}<\pi;\\ \mathrm{S}_{поп}, & \text{якщо } \alpha<\Omega\mathrm{t}<\pi-\alpha;\\ -\mathrm{S}_{поп}, & \text{якщо } -\pi+\alpha<\Omega\mathrm{t}<-\alpha, \alpha>0, 0<\alpha<0.5\pi.\end{cases} \qquad (3)$$

Радіальна та тангенціальна складові сили різання матеріалу заготівлі ортогональні. Тому на підставі лінійності перетворення Лапласа та з урахуванням теореми додавання отримано таке рівняння для підсумовування цих складових сили різання

$$F(p)=\sqrt{W_2^2(p)S_{поп}^2(p)+W_3^2(p)S_{пр}^2(p)}. \qquad (4)$$

Сила різання матеріалу заготівлі утворює вплив, який є джерелом крутильних коливань. Вал разом із кругом подано механічною системою з одним ступенем волі. Її рух маси описується диференційним рівнянням другого порядку:

$$J_{kp}\,\varphi''(t)+\beta_1\varphi'(t)+\gamma_1\varphi(t)=M_в(t)\ , \qquad (5)$$

де $J_{кр}$ – момент інерції ШК, β_1 – коефіцієнт демпфування, γ_1 – крутильна жорсткість валу, $M_в(t)=RF(t)$ – вплив, R – радіус ШК.

Після виконання процедури нормалізації та перетворень отримана передатна функція, яка пов'язує девіації та силу різання матеріалу заготівлі:

$$W_3(p)=\frac{R_{kp}t_1\gamma_1 p}{J_{kp}t_1p^2+\beta_1t_1p+\gamma_1}. \qquad (6)$$

На основі виразів (1), (2), (5) та (6) складена схема комп'ютерного моделювання процесу АШ (див. рис. 1). В результаті отримано графік девіацій швидкості обертання ШК у межах його одного оберту (рис. 2). З аналізу сигналу девіацій встановлено, що його амплітудне значення не перевищує 0,05 середнього періоду миттєвої швидкості обертання ШК. Часову реалізацію девіацій визначаємо в результаті цифрової обробки частотно-модульованого сигналу з малою глибиною модуляції. Ця процедура достатньо складна та потребує розробки апаратних засобів, які мають малий інтервал невизначеності навколо номінальної характеристики перетворення.

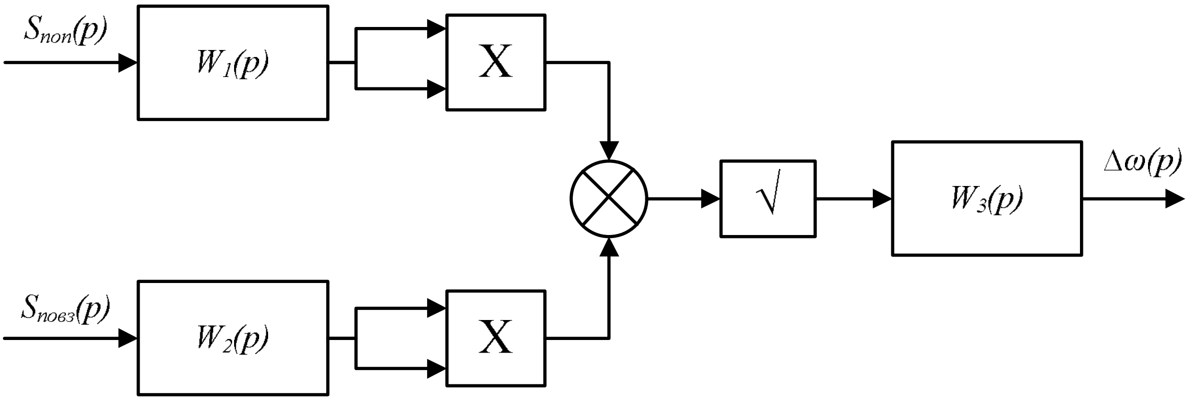

Рисунок 1 – Схема комп'ютерного моделювання процесу АШ

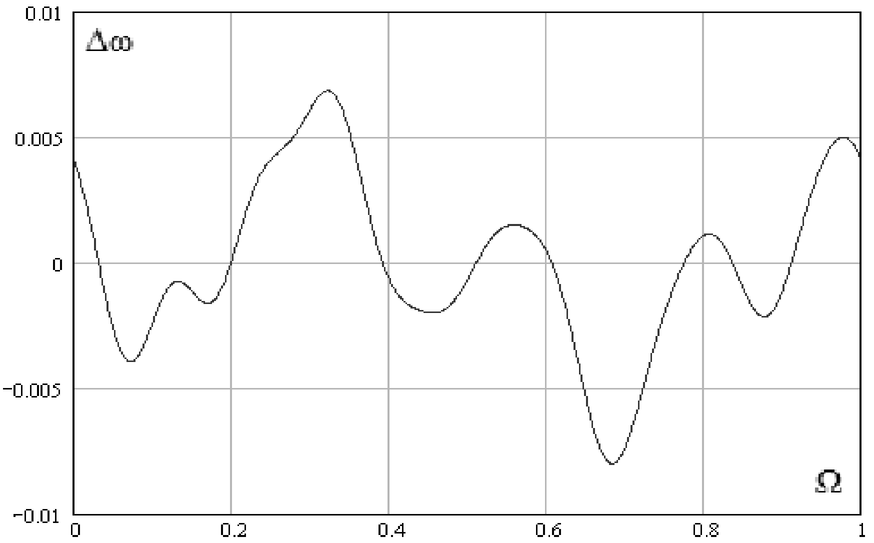

Рисунок 2 – Вихідний сигнал моделі

Розробка інформаційної технології корегування подач ШК. Виконаємо структурне перетворення математичної моделі процесу АШ шляхом переносу блоку $W_3(p)$ з її виходу на входи поперечної та повздовжньої подач ШК. У результаті такого переносу передатні функції внесків подач до сигналу девіацій отримано в такому вигляді [5, 7, 8]

$$W_{поп}(p)=\frac{K_n T_{13} b_1 p^2}{(T_{11}p+1)(T_{12}p+1)(T_{14}p+1)(T_{15}p+1)}; \qquad W_{поз}(p)=\frac{K_n T_{13} b_0 p}{(a_1 p+a_0)(T_{14}p+1)(T_{15}p+1)}.$$

Перехід до частотної області дає наступний вираз для сигналу девіацій швидкості обертання ШК:

$$\Delta\omega(\Omega)=\sqrt{W_3^2(\Omega)W_1^2(\Omega)S_{поп}^2(\Omega)+W_3^2(\Omega)W_2^2(\Omega)S_{повз}^2(\Omega)}. \quad (7)$$

Звідси, маємо вирази для дискретних частотних спектрів внесків:

$$\Delta\omega_{поп}(\Omega)=W_3(\Omega)W_1(\Omega)S_{поп}(\Omega) \text{ якщо } S_{повз}=0; \quad (8)$$

$$\Delta\omega_{повз}(\Omega)=W_3(\Omega)W_2(\Omega)S_{повз}(\Omega) \text{ якщо } S_{поп}=0. \quad (9)$$

Поперечна та повздовжня подачі ШК ортогональні. Тому підсумовування внесків виконано таким чином:

$$\Delta\omega^2(\Omega)=\Delta\omega_{поп}^2(\Omega)+\Delta\omega_{повз}^2(\Omega). \quad (10)$$

Звідси, маємо такий вираз:

$$1=\frac{\Delta\omega_{поп}^2(\Omega)}{\Delta\omega^2(\Omega)}+\frac{\Delta\omega_{повз}^2(\Omega)}{\Delta\omega^2(\Omega)}=\gamma_{поп}^2+\gamma_{повз}^2, \quad (11)$$

де $\gamma_{поп}$, $\gamma_{повз}$ – відповідно вагові коефіцієнти внесків подач до сигналу девіацій.

Комп'ютерним моделюванням отримано графіки внесків подач до сигналу девіацій швидкості обертання ШК у межах одного оберту (див. рис. 3).

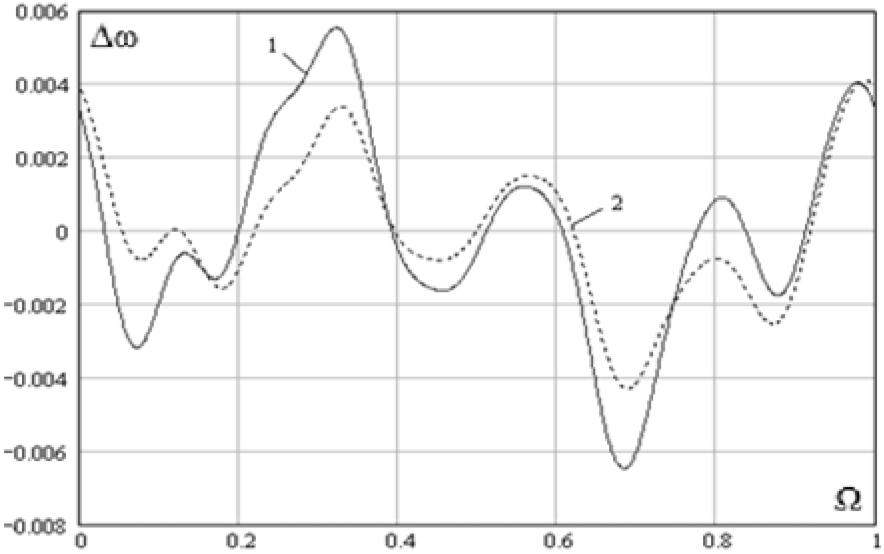

Рисунок 3 – Графіки внесків подач до сигналу девіацій:
1 – поперечної подачі, *2* – поздовжньої

На основі цих графіків встановлено вагові коефіцієнти поділу:

$$\gamma_{поп}=\frac{\Delta\omega_{поп}}{\Delta\omega}=0.81 \quad \text{та} \quad \gamma_{пр}=\frac{\Delta\omega_{повз}}{\Delta\omega}=0.586. \quad (12)$$

На основі допускового контролю розроблено алгоритм формування подач ШК обчислювальним пристроєм: часову реалізацію сигналу девіацій після нормалізації його

параметрів подаємо обмеженим рядом Фур'є; визначаємо діюче значення сигналу девіацій; нормовані значення подач одержуємо шляхом множення діючого значення сигналу девіацій на відповідний ваговий коефіцієнт; аналізуємо банк даних і за потреби виконуємо коригування величин подач.

Розробка інформаційно-вимірювального пристрою. Почато з аналізу складових похибки ПП [9]:

– похибка відновлення аналогового сигналу за дискретними відліками, яку визначено для його частотного подання у такому вигляді:

$$\delta_в = \frac{t_0}{8}\sqrt{0.1\sum_{i=1}^{10}\Omega_i^4}\,100\%; \tag{13}$$

– кінематична похибка ПП, яку визначено на прикладі дослідження допусків на виготовлення зубчастих коліс різного класу точності [4] та подано у табл. 1. Для оцінювань кінематичної похибки авторами застосовано такий вираз

$$\delta_к = \frac{\Delta m}{m}100\%, \tag{14}$$

де Δm – допуск на кінематичну похибку зубчастого колеса, m – модуль;

– динамічна похибка ПП.

Таблиця 1 – Чисельні дані кінематичної похибки

Клас точності ПП	4	5	6	7	8
$\delta_к$, %	0.80	1.25	2.00	2.75	4.00
Похибка вимірювань девіацій, %	16.0	25.0	40.0	55.0	80.0

Данні табл. 1 дозволяють зробити висновок: вимірювання сигналу девіацій миттєвої швидкості обертання потребують розробки технічних засобів для зменшення величини кінематичної похибки ПП. Один з можливих шляхів розв’язування цієї задачі є виконання його паспортизації. У результаті цього отримуємо поправки, які враховує ВП при визначенні сигналу девіацій. До складу ВП також входить пристрій синхронізації з відповідним датчиком.

Для компенсації кінематичної похибки авторами пропонується метод багатоканальних вимірювань інтервалів часу, які формуються одною рискою датчика та відповідають повному оберту його вала. При такому методі вимірювань миттєвої швидкості обертання ШК кінематична похибка не впливає на тривалість сформованих інтервалів часу. Данні табл. 1 та цей висновок доводять коректність запропонованого методу.

Динамічна похибка ПП являє собою зрушення за часом дискретних відліків часової реалізації девіацій, які виникають як наслідок кінематичної. Визначимо динамічну похибку зрушень за часом дискретних відліків сигналу, який отримано у результаті комп’ютерного моделювання процесу АШ (рис. 2). Подаємо цей сигнал у вигляді обмеженого ряду Фур’є. Абсолютне значення динамічної похибки визначається таким чином [10]:

$$\Delta_{дин} = \frac{1}{z}\sum_{i=0}^{z-1}\left[\Delta\omega(i\Delta t + \sigma_{см}) - \Delta\omega(i\Delta t)\right], \tag{15}$$

де z – кількість рисок ПП.

З точністю до величин другого порядку меншості відносно динамічної похибки підсумок замінюємо інтегралом:

$$\Delta_{дин} = \frac{1}{T}\int_0^T \left[\Delta\omega(\Omega t + \Omega\sigma_{см}) - \Delta\omega(\Omega t)\right] dt, \quad (16)$$

де Ω – кругова частота першої гармоніки частотного подання сигналу девіацій; $\sigma_{см}$ – середнє квадратичне відхилення часового зсуву дискретних відліків, яке визначаємо за допомогою допуску на виготовлення ПП.

Для гармонійного сигналу вираз (16) після математичних перетворень стане

$$\Delta_{дин,i} = \frac{2A_i}{\pi}\sin(\varphi_i - 0.5i\Omega\sigma_{см})\sin(i\Omega\sigma_{см}). \quad (17)$$

Звідси відносна динамічна похибка гармонійного сигналу має такий вигляд

$$\delta_i = \frac{2}{\pi}\sin(\varphi_i - 0.5i\Omega\sigma_{см})\sin(i\Omega\sigma_{см}). \quad (18)$$

Динамічну похибку ПП визначимо з урахуванням внесків гармонійних складових до сигналу девіацій швидкості обертання ШК

$$\delta_{дин} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10}(A_i\delta_i)^2}{\sum_{i=1}^{10}A_i^2}}. \quad (19)$$

Результати розрахунків динамічної похибки ПП подано у табл. 2.

Таблиця 2 – Чисельні дані динамічної похибки

Клас точності ПП	4	5	6	7	8
$\delta_{дин}$, %	3.1	4.8	7.4	9.9	14.1

Сутність методу апаратної компенсації кінематичної похибки полягає у наступному. Вихідний сигнал ПП за допомогою лічильника та дешифратора перетворюється у декілька імпульсних послідовностей, які відповідають моментам проходження біля чутливого елементу датчика одної риски та подаються на вхід відповідного каналу для вимірювань інтервалів часу. Кількість цих каналів у складі пристрою визначається кількістю рисок ПП.

Апаратну реалізацію каналів для вимірювань проведено з використанням методу дискретизації за часом. Усунення взаємних накладань вихідних сигналів каналів при їхньому поєднанні у сигнал вимірювальної інформації для пристрою цифрової обробки виконується за допомогою лічильників. Об’єм останніх та частота взірцевого генератора обираються таким чином, щоб переповнення лічильника виконувалося за час трохи менший ніж середній період імпульсної послідовності. При цьому з вимірювальної інформації кожного каналу виключається калібрований за тривалістю проміжок часу. Поєднання вихідних сигналів каналів в сигнал вимірювальної інформації виконується за допомогою схеми АБО.

На підставі цього методу розроблено оригінальний пристрій для вимірювань миттєвої швидкості обертання ШК (див. рис. 4), який описано в роботі [6]. На рис. 4 позначено: N – кількість каналів для вимірювань; Г – взірцевий генератор; Ф – формувач коротких імпульсів; $ТА_1$,…, $ТА_4$ – логічні схеми ТА; N_x – вихідний код; АБО1, АБО2 – логічні схеми

АБО; Т1,…, Т3 – тригера; ДШ – дешифратор; ПП – первинний перетворювач; З – лінія затримки; Л1,…, Л4 – лічильники імпульсів.

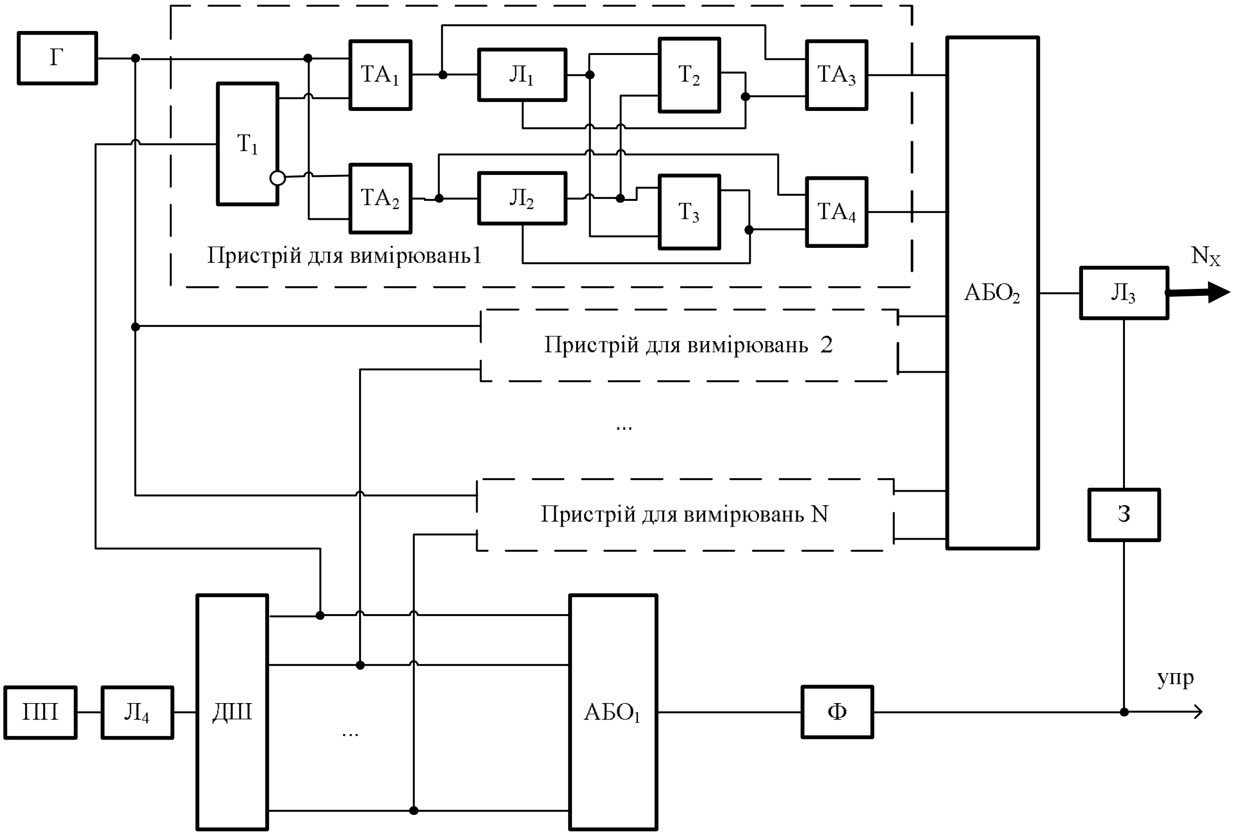

Рисунок 4 – Пристрій компенсації кінематичної похибки

Пристрій для вимірювань має два канали, які вимірюють тривалість імпульсів прямого та інверсного виходів Т1. Лічильники Л1 та Л2 формують калібровані проміжки часу. Сигнал вимірювальної інформації для пристрою цифрової обробки сигналу миттєвої швидкості обертання формує схема АБО2. Лічильник Л3 перетворює кількість імпульсів у цифровий код. Блок Ф формує сигнал запису коду у регістр пристрою цифрової обробки та за допомогою блоку З переводить Л3 до нульового стану.

Аналіз метрологічних характеристик пристрою. Виконуємо статистичну обробку експериментальних даних. На рис. 5 подано гістограму розкиду вихідного коду пристрою.

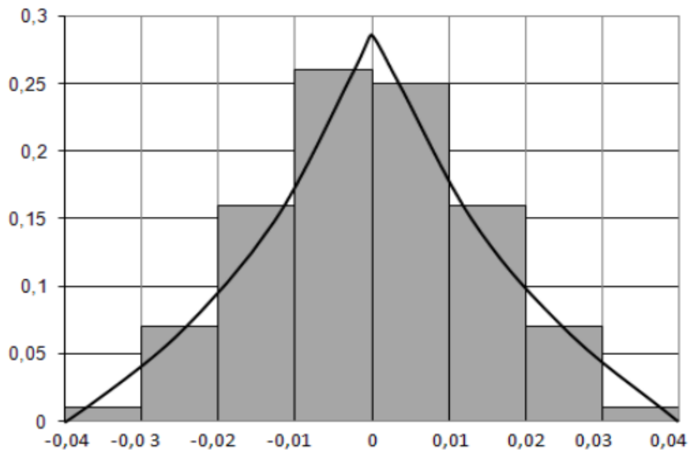

Рисунок 5 – Гістограма розкиду вихідного коду пристрою

Обсяг вибірки склав 151 вимірювання. Основні статистичні параметри такі:

$$\overline{X} = 2.0 \cdot 10^{-4}; \quad \sigma = 0.014248; \quad A = 0.0536; \quad E = -0.449.$$

Рівняння згладженої кривої розкиду вихідного коду пристрою має вигляд

$$f(x) = \frac{1}{2\sigma} e^{-\frac{|x|}{\sigma}} \quad \text{при} \quad x \in (-0.04, 0.04). \qquad (20)$$

Скористуємось інформаційним підходом для визначення похибки проведених вимірювань з багаторазовими спостереженнями.

Для отриманого закону розподілу похибки маємо

$$\ln f(x) = -\ln 2\sigma - \frac{|x|}{\sigma}. \qquad (21)$$

Звідси ентропія похибки запропонованого пристрою

$$H\left({x}/{x_n} \right) = \ln\left(2\sigma e^{\frac{\mu_1}{\sigma}} \right). \qquad (22)$$

Ентропійний інтервал невизначеності вихідного коду пристрою

$$\Delta = \sigma e^{\frac{\mu_1}{\sigma}} = 0.01465. \qquad (23)$$

Висновок. Побудовано математичну модель процесу АШ. У результаті комп’ютерного моделювання отримано сигнал девіацій швидкості обертання ШК у межах одного оберту. Встановлено глибину модуляції частотно-модульованого сигналу швидкості та сформульовано вимоги до метрологічних характеристик інформаційно-вимірювального пристрою. Доведено, що кінематична похибка виготовлення ПП суттєвим чином впливає на точність вимірювань сигналу девіацій швидкості обертання ШК. Запропоновано та обґрунтовано метод, який апаратно компенсує вказану похибку. Для компенсації кінематичної похибки запропонований метод багатоканальних вимірювань інтервалів часу, які формуються однією рисою датчика і відповідають повному обороту його вала. При такому методі вимірювань миттєвої швидкості обертання шліфувального круга кінематична похибка не впливає на тривалість сформованих інтервалів часу. Апаратну реалізацію каналів для вимірювання проведено з використанням методу дискретизації за часом. На основі частотного подання сигналу девіацій визначено динамічну похибку ПП. Встановлено коректність запропонованого методу апаратної компенсації кінематичної похибки та на його основі розроблено інформаційно-вимірювальний пристрій.

У результаті статистичної обробки дослідних даних з використанням інформаційного підходу визначено ентропійну похибку пристрою та встановлено ефективність інформаційно-вимірювального пристрою.

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. Реалізація непрямих вимірювань мікронерівностей деталей для підвищення ефективності алмазного шліфування / О.Ф. Єнікєєв, Г.В. Соколовська, Т.Л. Щербак // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ІПМЕ НАН України. – 2012. – Вип. 62. – С. 41 – 48.
3. Еникеев, А.Ф. Анализ эффективности аппаратных средств управления поперечной подачей шлифовального круга / А.Ф. Еникеев, Ф.М. Євсюкова, Л.А. Шишенко// Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2015. – № 4. – С. 132 – 137.
4. Допуски и посадки. Справочник. Часть 2/ [гл. ред. Мягков В.Д.] – Л.: Машиностроение, 1978. – с. 545 – 1032.
5. 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.
6. А.С. 1538679 СССР. МКИ G 01 M 15/00. Устройство для контроля неравномерности вращения вала двигателя внутреннего сгорания / Б.Г. Марченко, А.Н. Борисенко, А.Ф. Еникеев. Харьковский политехнический институт. – № 4428977; заявл. 23.05.88; опубл. 15.09.89, Бюл. № 34.
7. Єнікєєв, О.Ф. Комп'ютерна система підвищення ефективності алмазного шліфування в умовах неповної інформації / О.Ф. Єнікєєв // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. Міжнародний науково-технічний журнал ВНТУ. – 2014. – № 2. – С. 40 – 49.
8. Єнікєєв, О.Ф. Комп'ютерна система управління алмазним шліфуванням в умовах неповної інформації /О.Ф. Єнікєєв //Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 6. – С.15 – 24.
9. Єнікєєв О.Ф. Метрологічні характеристики перетворювача миттєвої швидкості обертання шліфувального круга при алмазному шліфуванні / О.Ф. Єнікєєв, О.В. Монченко, Т.Л. Щербак // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ІПМЕ НАН України. – 2012. – Вип. 63. – С. 42 – 48.
10. Горлач, А.А. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике / А.А. Горлач, М.Я. Минц, В.Н. Чинков. – К.: Техника, 1989. – 151 с.

References

1. Enikeev, A.F. (2001), *Optimal'noe upravlenie tehnologicheskim processom almaznogo shlifovanija* [Optimum process control diamond grinding], DSMA, Kramatorsk, Ukraine.
2. 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 tekhnologiï. Zbirnik naukovih prac' IPME NAN Ukraïni.*, № 62, pp. 41 – 48.
3. Enikeev, A.F., Evsukova F.M. and Shyshenko L.A. (2015), «Analysis of the efficiency of the hardware control cross feed grinding wheel», *Vestnik nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta «KhPI».*, № 4, pp. 132– 137.
4. Mjagkov, E. (1978*), Dopuski i posadki. Spravochnik.* [Tolerances and landing. Directory.], Engineering, Leningrad, Russia.
5. 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.
6. Marchenko, B.G., Borisenko A.N. and Enikeev A.F. Kharkiv Polytechnic Institute (1989), *Ustrojstvo dlya kontrolya neravnomernosti vrashcheniya vala* [Device for monitoring the shaft rotation non-uniformity], State Register of Patents of USSR, Moscow, USSR, Pat. № 1538679.
7. Enikeev, A.F. (2014), «Computer system efficiency diamond grinding under conditions of in-

complete information», *Informacijni tekhnologiї ta komp'yuterna inzheneriya. Mizhnarodnij naukovo-tekhnichnij zhurnal VNTU.*, № 2, pp. 40 – 49.
8. Enikeev, A.F. (2014), «Computer Control diamond grinding under conditions of incomplete information», *Visnik Vinnic'kogo politekhnichnogo institutu.*, № 6, pp.15 – 24.
9. Enikeev, A.F., Monchenko A.V. and Shcherbakov T.L. (2014), «Metrological characteristics of the converter instantaneous speed of rotation of the grinding wheel with diamond grinding», *Modelyuvannya ta informacijni tekhnologiї. Zbirnik naukovih prac' IPME NAN Ukraїni.*, №. 63, pp. 42 – 48.
10. Horlatch, A.A., Mynts M.J. and Chynkov V.N. (1989), *Cifrovaya obrabotka signalov v izmeritel'noj tekhnike* [Digital signal processing in measurement technology], Tehnika, Kiev, Ukraine.

Надійшла до редакції:
07.04.2016

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

А.Ф. Еникеев, И.Б. Абрамская
Украинская государственная академия железнодорожного транспорта,
О.В. Субботин
Донбасская государственная машиностроительная академия

Анализ метрологических характеристик измерительного преобразователя частотно-модулированных сигналов. *Разработана математическая модель процесса алмазного шлифования с применением метода косвенных измерений микронеровностей поверхности детали. Разработана информационная технология корректировки подач шлифовального круга на основе методов непосредственного цифрового и покоординатного управления, иерархического принципа, косвенных измерений микронеровностей и режущих свойств круга, принципов децентрализации и распараллеливания процессов обработки входящей информации. На основе минимизации квадратичного критерия качества с использованием эталонных математических моделей аппаратных средств с известным запаздыванием разработаны устройства обработки сигналов. Разработано информационно-измерительное устройство, реализующее метод аппаратной компенсации кинематической погрешности.*

Ключевые слова: *алмазное шлифование, устройство преобразования, микронеровность, модель.*

A.F. Enikeev, I.B. Abramsky
Ukrainian State Academy of Railway Transport,
O.V. Subotin
Donbass State Engineering Academy

Analysis of metrological characteristics of the transmitter of frequency-modulated signals. *The aim of this study is to develop effective hardware and to analyze its metrological characteristics. Information speed signal processing technology consists of computational procedures: the selection of signal deviations and presenting its limited Fourier series; determining the current value and its comparison with the standard. A mathematical model of the process of diamond grinding to improve the economic efficiency of technological processes of diamond grinding under conditions of incomplete information is considered. For this purpose, the method of indirect measurements of the microscopic irregularities of surface of the part based on digital processing of deviations of wheel rotation speed signal is offered. Hardware processing digital frequency-modulated signal are: transducer, the transducer and the computing device that analyzes the database and generates correction signals innings. As a result of computer simulation of signal deviations rotational speed of the grinding wheel within one revolution was obtained. The peak value of deviations does not*

exceed 0.05 instantaneous average period of the rotation speed of the grinding wheel. Hardware was developed, which have a small uncertainty interval around the nominal frequency characteristic. An information technology of adjustment of the grinding wheel was developed on the basis of direct digital and wise management, the hierarchical principle, indirect measurements of the microscopic irregularities and cutting properties of the circle, decentralization and parallelization. It is proved that the kinematic error of the primary converter manufacturing significantly affects the accuracy of the measurement signal deviations rotational speed of the grinding wheel. With this method of measuring the instantaneous speed of rotation of the grinding wheel kinematic error does not affect the duration of the time intervals generated. Hardware implementation for the measurement channels was carried out using the method of sampling time. On the basis of minimizing the quadratic criterion of quality with the use of standard mathematical models of hardware with a known delay a signal processing device was developed. An information-measuring device was developed that implements the method of hardware compensation of the kinematic error.
Keywords: *diamond grinding, converting apparatus, microroughnesses, model.*

Єнікєєв Олександр Фанилович, Україна, закінчив Харківський політехнічний інститут, доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизованих систем електричного транспорту Українського державного університету залізничного транспорту (площа Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, 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. Шкадінова, 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.

Абрамська 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.