

**О. Ф. ЄНІКЄВ, Ф. М. ЄВСЮКОВА, О. Ю. ПРИХОДЬКО, О. В. НАБОКА**

### **АНАЛІЗ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОДУКТИВНІСТЮ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ**

Запропоновано технологію безперервного оброблення поверхні деталі на основі поєднання технологічних процесів алмазного та алмазно-іскрового шліфування. Розроблено структурну схему системи автоматичного керування параметрами технологічних процесів з використанням принципу керування за відхиленням. Побудовано математичні моделі компонент системи керування та в результаті аналізу її структурної схеми отримано передавальну функцію. На основі мінімізації квадратичного критерію якості із застосуванням еталонної моделі синтезовано пристрій оброблення входних сигналів. Побудовано схему комп'ютерного моделювання у середовищі Matlab процесів перетворення входної інформації апаратними засобами системи автоматичного керування параметрами технологічних процесів. У результаті комп'ютерного моделювання встановлено, що апаратні засоби забезпечують потрібну продуктивність та точність оброблення входних сигналів.

**Ключові слова:** апаратні засоби, продуктивність, математичне та комп'ютерне моделювання.

**А. Ф. ЕНИКЕЕВ, Ф. М. ЕВСЮКОВА, О. Ю. ПРИХОДЬКО., Е. В. НАБОКА**

### **АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ**

Предложена технология непрерывной обработки поверхности детали на основе объединения технологических процессов алмазного и алмазно-искрового шлифования. Разработана структурная схема системы автоматического параметрами технологических процессов с использованием принципа управления по отклонению. Построены математические модели компонент системы управления и в результате анализа структурной схемы получена передаточная функция. На основе минимизации квадратичного критерия качества с использованием эталонной модели синтезировано устройство обработки входных сигналов. Построено схему компьютерного моделирования в среде Matlab процессов преобразования входной информации аппаратными средствами системы автоматического управления параметрами технологических процессов. В результате компьютерного моделирования установлено, что аппаратные средства обеспечивают нужную производительность и точность обработки входных сигналов.

**Ключевые слова:** аппаратные средства, производительность, математическое и компьютерное моделирование.

**A. YENIKIEIEV, F. YEVSUKOVA, O. PRIHODKO., O. NABOKA**

### **ANALYSIS OF THE FREQUENCY CHARACTERISTICS OF THE PERFORMANCE MANAGEMENT SYSTEM OF THE DIAMOND GRINDING PROCESS**

The technology of continuous surface treatment of parts based on the combination of technological processes of diamond and diamond-spark grinding is proposed. A block diagram of the system of automatic parameters of technological processes was developed using the principle of deviation control. Mathematical models of the control system components have been built and the transfer function has been obtained as a result of the analysis of the structural scheme. Based on the minimization of the quadratic quality criterion using the reference model, an input signal processing device was synthesized. A scheme of computer simulation in the Matlab environment of the processes of input information conversion by the hardware of the automatic control system of the technological process parameters has been built. As a result of computer simulation, it was found that the hardware provides the necessary performance and accuracy of processing input signals.

**Keywords:** hardware, performance, mathematical and computer modeling.

**Вступ.** Програмне керування рухами апаратних засобів верстату скорочує час оброблення деталі та забезпечує задану шорсткість поверхні [1]. Технологія безперервного оброблення поверхні деталі поєднує у собі процеси алмазного (АШ) та алмазно-іскрового шліфування (АІШ), що забезпечує підвищення продуктивності.

**Постановка проблеми.** Інформаційний зв'язок між процесом АШ та апаратними засобами забезпечують сигнали струму та напруги приводу головного руху верстату, а також сигнал швидкості обертання круга. На основі допускового контролю та непрямих вимірювань різальної властивості шліфувального круга вони реалізують технологію безперервного оброблення поверхні деталі. Інформаційний зв'язок між апаратними засобами та процесом АІШ забезпечує сигнал правки круга.

**Розв'язування задачі.** Методика розроблення апаратних засобів із відповідними метрологічними характеристиками й продуктивністю для систем керування параметрами технологічних процесів складається з таких процедур:

- розробляємо математичні моделі компонент із використанням перетворення Лапласа;
- на основі інформаційного підходу визначаємо смугу нечутливості первинного перетворювача входного сигналу навколо номінальної характеристики перетворення;
- визначаємо передавальну функцію в результаті перетворень її структурної схеми;
- розраховуємо частотні характеристики системи автоматичного керування (САК). Спрощення математичної моделі забезпечується за рахунок погашення коренів чисельника та знаменника передатної функції, а також у відкиданні коренів другого порядку малості;
- моделюємо завади компонент та за допомогою методики підсумовування випадкових складових встановлюємо смугу невизначеності вихідного сигналу;
- синтез пристрою оброблення входного сигналу виконуємо на основі мінімізації квадратичного критерію якості із застосуванням еталонної моделі;

- встановлюємо математичну модель вхідного сигналу та визначаємо його частотне подання;

- за допомогою теореми про згортку визначаємо вихідний сигнал, який використовуємо в якості прогнозованого при аналізі ефективності апаратних засобів оброблення інформації;

- будуємо схему комп'ютерного моделювання процесів перетворення інформації. У результаті аналізу вихідного сигналу робимо висновок про продуктивність та точність апаратних засобів оброблення вхідної інформації.

Структурну схему апаратних засобів, які організують технологію безперервного оброблення поверхні деталі, наведено на рис. 1. Функціонально САК складається з таких компонент: вимірювальний перетворювач потужності (ВПП), пристрій оцінювання шпаруватості (ПОШ), пристрій 5 цифрового оброблення сигналів, пристрій управління шпаруватістю (ПУШ) та генератор типу ШГІ. Виконаємо розроблення математичних моделей компонент та в результаті аналізу структурної схеми САК отримаємо вираз для передавальної функції.

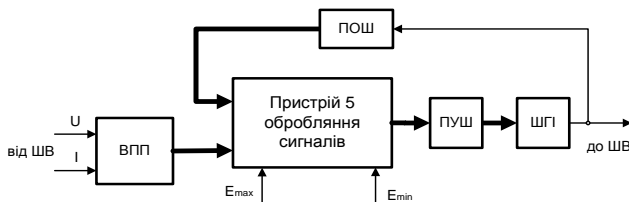


Рис. 1 – Структурна схема САК

Функцію цифрового задавання шпаруватості вихідного сигналу генератора ШГІ реалізує пристрій 5 оброблення сигналів, який при цьому також виконує лінійні обчислювальні операції. Отже, цей компонент подаємо лінійним імпульсним фільтром із такою функцією передачі [3]

$$W_1(p) = \frac{1 - e^{-p\tau_r}}{\tau_r}, \quad (1)$$

де  $\tau_r$  – запізнення.

Специфіка роботи блоку ВПП у складі САК дозволяє подати його імпульсним елементом, який має наступну передавальну функцію [61]

$$W_2(p) = \frac{1 - e^{-pT_{np}}}{p}, \quad (2)$$

де  $T_{np}$  – час перетворення інформації ВПП.

Генератор ШГІ подаємо пропорційною ланкою, яка має коефіцієнт перетворення  $K_{III}$  та відповідно таку передавальну функцію [3]

$$W_3(p) = K_{III}. \quad (3)$$

Будемо також вважати, що пристрій 5 виконує підсумовування вихідних сигналів компонент ПОС та ВПП. На підставі вище викладеного отримаємо таку структурну схему математичної моделі апаратних засобів, які організують технологію безперервного оброблення поверхні деталі (рис. 2).

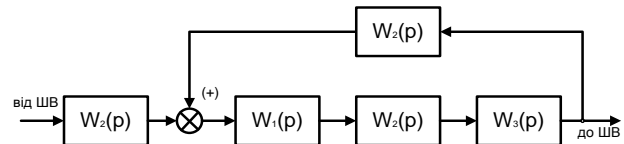


Рис. 2 – Структурна схема моделі апаратних засобів

Виконаємо аналіз структурної схеми з метою отримання передавальної функції. При перетворенні структурної схеми будемо вважати вузол ШВ пропорційною ланкою із коефіцієнтом передачі  $K_{OV}$ . Тоді, відповідно до правил перетворення структурних схем, маємо такий вираз для передавальної функції

$$W_4(p) = \frac{1}{p} \left[ 1 - e^{-pT_z} + K_{OV} \left( 1 - e^{-pT_{np}} \right) \right], \quad (4)$$

де  $T_z$  – період вихідного сигналу генератора ШГІ.

Компоненти ПОС та ВПП мають підвищену швидкодію. Відповідно, цілком коректна така заміна експоненційних функцій

$$e^{-pT_z} \approx 1 - pT_z. \quad (5)$$

Із урахуванням цього маємо наступне рівняння

$$W_5(p) = T_z + T_{np} K_{OV}. \quad (6)$$

Передавальна функція розімкненого контуру, дорівнює добутку передавальних функцій окремих компонент

$$W_6(p) = K_{III} (T_z + K_{OV} T_{np}) \frac{(1 - e^{-p\tau_r}) (1 - e^{-pT_z})}{\tau_r p}. \quad (7)$$

Останній вираз приведемо до наступного вигляду

$$W_6(p) = K_{III} (T_z + K_{OV} T_{np}) \frac{(e^{p\tau_r} - 1) (e^{pT_z} - 1)}{\tau_r e^{p\tau_r} p e^{pT_z}}. \quad (8)$$

Виконаємо заміну експоненційних функцій обмеженим ступеневим рядом (5). Після перетворень передатна функція розімкненого контуру набуває такого вигляду

$$W_6(p) = \frac{K_{III} p T_z (T_z + K_{OV} T_{np})}{(1 + \tau_r p) (1 + T_z p)}. \quad (9)$$

Звідси передавальна функція апаратних засобів програмного задавання шпаруватості сигналу генератора ШГІ виходить у вигляді

$$W_7(p) = \frac{K_{III} p T_z (T_z + K_{OV} T_{np})}{\tau_r T_z p^2 + [\tau_r + T_z + K_{III} T_z (T_z + K_{OV} T_{np})] p + 1}. \quad (10)$$

Пошук полюсів дозволяє подати передавальну функцію апаратних засобів програмного задавання параметрів АШ у вигляді послідовного з'єднання елементарних ланок

$$W_8(p) = \frac{K_{III} p T_z (T_z + K_{OV} T_{np})}{(T_{16} p + 1) (T_{17} p + 1)}. \quad (11)$$

Для обчислень інтеграла Дюамеля застосуємо зворотне перетворення Лапласа до рівняння (11). Після перетворень отримаємо

$$W_9(t) = B_{11}e^{-\frac{t}{T_{16}}} + B_{12}e^{-\frac{t}{T_{17}}}, \quad (12)$$

$$B_{11} = \frac{K_{III}T_z(T_z + K_{OY}T_{np})}{T_{16}(T_{17} - T_{16})}, \quad B_{12} = \frac{K_{III}T_z(T_z + K_{OY}T_{np})}{T_{17}(T_{16} - T_{17})}$$

де Вхідний сигнал апаратних засобів програмного задавання параметрів АПШ подаємо у вигляді одиничної функції. Інтеграл згортки на основі виразу (12) дав рівняння, яке описує динаміку вихідного сигналу

$$y(t) = 1(t) + \frac{B_{12}T_{17}}{T_{17} + 1}e^{-\frac{T_{17}t}{T_{17} + 1}} - \frac{B_{11}T_{16}}{T_{16} + 1}e^{-\frac{T_{16}t}{T_{16} + 1}} \quad (13)$$

Цей вираз описує прогнозований вихідний сигнал, який буде використано в подальшому при аналізі продуктивності апаратних засобів. Отримаємо дискретну передавальну функцію апаратних засобів програмного задавання параметрів АПШ. Для цього розкладаємо вираз  $W_{11}(p)/p$  на прості дроби

$$\frac{W_{11}(p)}{p} = k_{III}T_z(T_z + K_{OY}T_{np}) \left[ \frac{T_{18}T_{16}}{(T_{17} - T_{16})(T_{17}p + 1)} - \frac{T_{18}T_{16}}{(T_{17} - T_{16})(T_{16}p + 1)} \right],$$

де  $T_{18} = \tau_r$ .

Відповідно до таблиці z-перетворень знаходимо вираз для передатної функції апаратних засобів програмного задавання параметрів АПШ

$$W_{45}(z) = k_{III}T_z(T_z + K_{OY}T_{np}) \left[ \frac{T_{18}z}{(T_{17} - T_{16}) \left( z - e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} \right)} - \frac{T_{18}z}{(T_{17} - T_{16}) \left( z - e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} \right)} \right]$$

Після перетворень подаємо останній вираз у вигляді відносини ступеневих поліномів

$$W(z^{-1}) = \frac{k_{III}T_z(T_z + K_{OY}T_{np}) \frac{T_{18}}{T_{17} - T_{16}} \left( e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} + e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} \right) z^{-1}}{1 - \left( e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} + e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} \right) z^{-1} + e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} z^{-2}} \quad (14)$$

Кінцево-різницеve рівняння, яке описує динаміку роботи апаратних засобів програмного задавання параметрів АПШ, використовує наступні оператори звуку

$$z^{-2}y[nT_0] = y_{n-2} \quad z^{-1}y[nT_0] = y_{n-1}$$

на їхній основі рівняння (10) прийме такий вигляд

$$y_n + a_1y_{n-1} + a_2y_{n-2} = b_1u_{n-1}, \quad (15)$$

$$a_1 = - \left( e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} + e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} \right), \quad a_2 = e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} e^{-\frac{T_0}{T_{17}}};$$

$$b_1 = k_{III}T_z(T_z + K_{OY}T_{np}) \frac{\tau_r}{T_{17} - T_{18}} \left( e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} + e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} \right)$$

Із врахуванням подання вхідного сигналу апаратних засобів програмного задавання параметрів АПШ у вигляді функції Хевісайда передавальна функція пристрою 5 оброблення сигналів запишеться так [4]

$$W(z) = \frac{k_{III}T_z(T_z + K_{OY}T_{np}) \frac{\tau_r}{T_{17} - T_{16}} \left[ z^2 + \left( e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} + e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} \right) z \right]}{e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} z^2 - \left( e^{-\frac{T_0}{T_{17}}} + e^{-\frac{T_0}{T_{16}}} \right) z + 1} \quad (16)$$

На основі виразів (14) та (16) за допомогою методик роботи [2] побудовано схему комп'ютерного моделювання процесу перетворення інформації апаратними засобами програмного задавання параметрів АПШ (рис. 3). В результаті комп'ютерного моделювання встановлено, що апаратні засоби задовольняють вимогам за швидкодією (рис. 4).

Час відпрацювання вхідного сигналу у вигляді стрибка величиною 0.043 склав 0.12мс. Для отримання передавальної функції похибки виконаємо аналіз структурної схеми апаратних засобів. За умови наявності в їхньому складі замкненого контуру, який володіє одиничною негативним зворотнім зв'язком, в результаті перетворень отримаємо таке операторне рівняння

$$G_2(p) = \frac{(T_{16}p + 1)(T_{17}p + 1)}{(T_{16}p + 1)(T_{17}p + 1) + K_{III}pT_z(T_z + K_{OY}T_{np})} \quad (17)$$

Перехід в частотну область дає наступне рівняння похибки

$$\delta = \sqrt{\frac{(1 - T_{16}T_{17}\Omega^2)^2 + (T_{16} + T_{17})^2\Omega^2}{(1 - T_{16}T_{17}\Omega^2)^2 + [T_{16} + T_{17} + K_{III}T_z(T_z + K_{OY}T_{np})]^2\Omega^2}} \quad (18)$$

Результати розрахунку похибки, які отримано за допомогою останнього рівняння, задовільно узгоджуються із аналізом метрологічних характеристик окремих компонент. Величина відносної похибки склала 0.03%. Отже, апаратні засоби задовольняють вимогам за точністю.

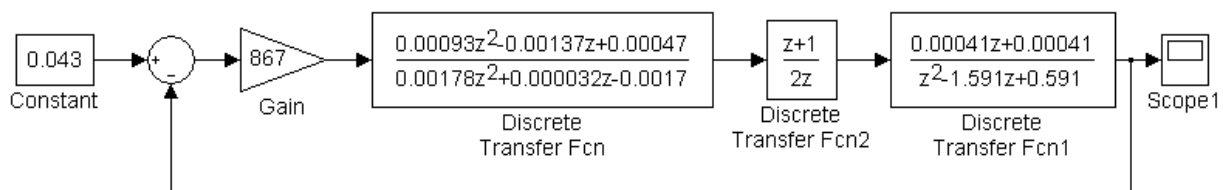


Рис. 3 – Структурна схема комп'ютерного моделювання процесу перетворення інформації

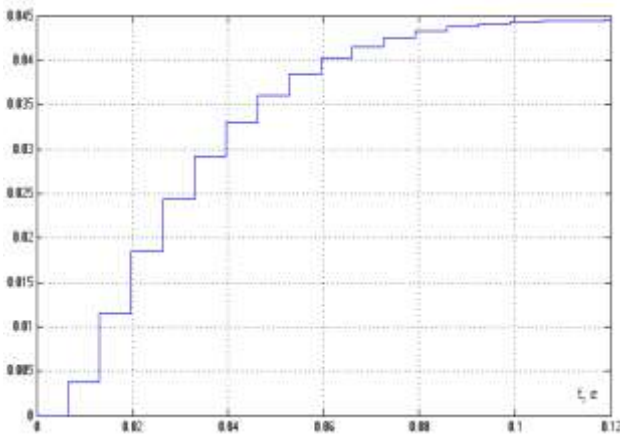


Рис. 4 – Результати комп'ютерного моделювання

**Висновок.** На основі поєднання технологічних процесів алмазного та алмазно-іскрового шліфування запропоновано нову технологію безперервного оброблення поверхні деталі. Із використанням принципу керування за відхиленням розроблено структурну схему системи автоматичного керування параметрами технологічних процесів. Побудовано математичні моделі компонент та в результаті аналізу структурної схеми системи керування отримано передавальну функцію. На основі мінімізації квадратичного критерію якості із застосуванням еталонної моделі синтезовано пристрій оброблення вхідних сигналів. Встановлено, що апаратні засоби забезпечують потрібну продуктивність та точність оброблення вхідних сигналів.

## Список літератури

1. Еникеев А.Ф. Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования.–Краматорск: ДГМА, 2001. – 160 с.
2. Лазарев Ю.П. Моделирование процессов и систем в Matlab: Учебный курс. – С.Пб.: Питер; К.: Изд. группа BHV, 2005. – 512 с.
3. Анализ эффективности аппаратных средств управления поперечной подачей шлифовального круга / А.Ф. Еникеев, Ф.М. Євсюкова, Л.А. Шищенко// Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2015. – № 4. – С. 132 – 137.
4. Синтез цифрового регулятора поперечной передачи шлифовального круга /Єнікеев О.Ф., Зиков І.С./ Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: №57, 2008.– С. 87–93.

## References (transliterated)

1. Yenikieiev A.F. *Optimalnoe upravlenie tehnologicheskim processom almaznogo shlifovaniya*. [Optimal management by the technological process of the diamond polishing.] Kramatorsk: DGMA, 2001. 160 p.
2. Lazarev Yu.P. *Modelirovanie processsov i sistem v Matlab: Training course*. [Modeling of processes and systems in Matlab] - S.Pb.: Peter; K.: Publ. group BHV, 2005. - 512 p.
3. Yenikieiev A.F., Yeysiukova F.M., Shushenko L.A. *Analiz effektivnosti apparatnih sredstv upravleniya poperechnoj podachej shlifovalnogo kruga* [The analysis of the efficiency of hardware control of the longitudinal feed of the grinding wheel] Vestnik natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta «KhPI». – Kharkov. – No 4, 2015. pp. 132 – 137.
4. Yenikieiev O.F., Zikov I.S. *Sintez tsyfrovoho rehuliatora poperechnoi peredachi shlifovalnogo kruga* [Synthesis of digital regulator of transversal transmission of the grinding circle] / Vestnik national nogo tekhnicheskogo universiteta «KhPI». Kharkov. no 57, 2008. pp. 87 – 93..

Надійшла (received) 28.11.2018

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Єнікеев Александр Фанилович (Еникеев Александр Фанилович, Yenikieiev Oleksandr)**– доктор технічних наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія, завідувач кафедри інтелектуальних систем прийняття рішень, м. Краматорськ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8633-3233>, тел.: (050)-194-33-57, (096)-245-32-83, (063)-205-93-97, e-mail: [Al\\_enikeev@bigmir.net](mailto:Al_enikeev@bigmir.net)

**Євсюкова Фатима Магомедівна (Евсюкова Фатима Магомедбиевна, Yevsiukova Fatyma)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів, м.Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9764-4106>, тел.: (057)-720-66-25, моб. +380979412299; e-mail: [evsyukova\\_fatima@mail.ru](mailto:evsyukova_fatima@mail.ru)

**Приходько Ольга Юрійвна (Приходько Ольга Юрьевна, Prihodko Olga)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів, м.Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6452-0465>, тел.: (057)-720-66-25, e-mail: [olmurakami@mail.ru](mailto:olmurakami@mail.ru)

**Набока Елена Володимирівна (Набока Елена Владимировна, Naboka Olena)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів, м.Харків, Україна, тел.: (057)-720-66-25, e-mail: [namirauza@gmail.com](mailto:namirauza@gmail.com)