

УДК 621.822.172:621.7.079

Д.Ю. Федориненко, д-р техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ОБРОБЛЕННЯ НА ВЕРСТАТІ З РЕГУЛЬОВАНИМИ ШПИНДЕЛЬНИМИ ГІДРОСТАТИЧНИМИ ОПОРАМИ

Д.Ю. Федориненко, д-р техн. наук

Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ НА СТАНКЕ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ШПИНДЕЛЬНЫМИ ГИДРОСТАТИЧЕСКИМИ ОПОРАМИ

D.Yu. Fedorynenko, Doctor of Technical Sciences

Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

ANALYSIS OF THE ACCURACY OF MACHINING WITH ADJUSTABLE SPINDLE HYDROSTATICAL SUPPORTS

Одним з найбільш перспективних шляхів підвищення точності оброблення на верстатах є застосування шпиндельних гідростатичних опор регульованого типу. В роботі здійснено оцінювання ефективності використання регулювання величиною зазору в гідростатичних опорах з пружними елементами корпусу з метою підвищення точності оброблення різанням. Точність оброблення різанням визначалася за відхиленням від круглості оброблених поверхонь партії зразків-виробів. Розроблено методику спектрального та кореляційного аналізу точності оброблення партії зразків-виробів. Встановлені закономірності формування відхилень від круглості оброблених поверхонь, суттєвих гармонік спектра залежно від процесу регулювання величиною статичного зазору в опорних гідростатичних вузлах шпинделя. Показано ефективність промислового використання гідростатичних опор регульованого типу для підвищення точності шліфування.

Ключові слова: точність, шпиндель, гідростатична опора, регулювання, статичний зазор.

Одним из наиболее перспективных путей повышения точности обработки на станках является применение шпиндельных гидростатических опор регулируемого типа. В работе осуществлена оценка эффективности использования регулирования величиной зазора в гидростатических опорах с упругими элементами корпуса с целью повышения точности обработки резанием. Точность обработки резанием определялась по отклонениям от круглости обработанных поверхностей партии образцов-изделий. Разработана методика спектрального и корреляционного анализа точности обработки партии образцов-изделий. Установлены закономерности формирования отклонений от круглости обработанных поверхностей, существенных гармоник спектра в зависимости от процесса регулирования величиной статического зазора в опорных гидростатических узлах шпинделя. Показана эффективность промышленного использования гидростатических опор регулируемого типа для повышения точности шлифования.

Ключевые слова: точность, шпиндель, гидростатическая опора, регулирование, статический зазор.

One of the most promising ways to improve the accuracy of processing on the machines is the use of spindle hydrostatic bearings adjustable type. In the work carried out to evaluate the efficiency adjust the size of the gap in hydrostatic bearings with elastic elements of the body to increase the accuracy of cutting. Accuracy of cutting determined by the deviation from circularity of treated surfaces party samples of the articles. Developed a method of spectral and correlation analysis of the accuracy of processing batches of products. Regularities of the formation of deviations from the roundness of the processed surfaces, significant harmonic spectrum depending on the regulatory process largest static gap in the support of the spindle hydrostatic knots. Shows the effectiveness of the industrial use of hydrostatic bearings adjustable type to improve the grinding accuracy.

Key words: precision, spindle, hydrostatic bearing, regulation, static gap.

Постановка проблеми. Нині переважає кількість ($\approx 90\%$) шпиндельних вузлів верстатів встановлені на опори кочення. Проте, як відомо, опори кочення, навіть прецизійні, мають обмежені можливості щодо забезпечення високої якості шпиндельних вузлів, насамперед, за показниками точності, швидкохідності, вібро- та теплостійкості, ресурсу роботи. Перспективним шляхом підвищення точності оброблення на верстатах є застосування регульованих у процесі експлуатації гідростатичних підшипників як опор шпиндельних вузлів. Використання регульованих конструкцій гідростатичних опор (ГСО) забезпечує розширення технологічних можливостей верстатів за рахунок суміщення чорнового та чистового оброблення, підвищення точності та продуктивності механічного оброблення.

Тому актуальною проблемою машинобудування є підвищення точності механічного оброблення на верстатах завдяки розробленню та використанню шпindelних ГСО регульованого типу.

Аналіз досліджень і публікацій. Загальні питання аналізу точності верстатів широко висвітлені в роботах [1; 2], де зазначається, що основним вузлом верстата, який визначає точність і продуктивність оброблення, є шпindelний вузол.

Перспективним шляхом забезпечення заданої точності є керування точністю процесу оброблення, що може бути реалізовано за вхідними або вихідними параметрами оброблюваних заготовок [3; 4]. Найбільш перспективними є системи адаптивного керування точністю оброблення [4], які забезпечують високі показники точності розмірів, геометричних форм оброблюваних різанням деталей.

Для оцінювання точності токарного оброблення В.В. Юркевич використовує „геометричний образ” деталі, який формується в результаті спільного аналізу траєкторій руху осі шпindelя і вершини різця [5; 6]. Вплив інших компонентів технологічної системи верстата при цьому нехтується. Також зазначається, що суттєві спектральні складові коливань осі шпindelя практично повністю переносяться в спектр геометричних відхилень оброблюваних різанням поверхонь.

В.Б. Струтинським створена узагальнена методика спектрального та кореляційного аналізу робочих процесів технологічних машин [7], на основі якої встановлюються закономірності формування вихідної точності машин, зокрема металорізальних верстатів [8].

Однак, незважаючи на накопичений досвід, слід зазначити, що на сьогодні відсутні методики аналізу точності верстатів зі шпindelними ГСО спеціального регульованого типу, які б дозволяли оцінити їх ефективність з погляду підвищення точності оброблення.

Мета статті. Оцінювання ефективності використання шпindelних гідростатичних опор регульованого типу для підвищення точності механічного оброблення на шліфувальних верстатах.

Виклад основного матеріалу. Точність є одним із найважливіших критеріїв якості верстата, що згідно з [9] визначається трьома групами показників: показники, які характеризують точність оброблення зразків-виробів; показники, які характеризують геометричну точність верстатів; додаткові показники.

Показники точності верстата багато в чому визначаються точністю шпindelного вузла і залежать від правильного вибору типу та конструкції його опор. Так, регульовані ГСО шпindelного вузла верстата визначають показники жорсткості, динамічні властивості верстата, характеристики точності та якості оброблених різанням поверхонь. Докладно принцип дії та схемні рішення регульованих ГСО викладені в монографіях [10; 11].

У цій роботі визначення характеристик точності верстата, оснащеного регульованими шпindelними ГСО, здійснено за показниками точності оброблення партії зразків-виробів, які відповідають вимогам [11]. Партія заготовок була поділена на три групи, які оброблені шліфуванням на торцекруглошліфувальному верстаті 3Т161 з регульованими ГСО шліфувального шпindelя, причому кожній групі відповідає постійне значення регульованого параметра – величини радіального статичного зазору δ_0 . Режими оброблення не змінювалися для всієї партії.

У процесі досліджень отримані круглограми оброблених шліфуванням поверхонь зразків-виробів (рис. 1).

Круглограми поверхонь, оброблених на верстаті з регульованими шпindelними ГСО, майже не мають хвилястості. На круглограмах простежуються незначні зміни форми поверхні у вигляді огранювання. Амплітуда хвилі при цьому не перевищує 3 мкм при періоді по куту повороту шпindelя $5...10^\circ$ (рис. 1). Оброблення зразків-виробів

здійснена при частоті обертання шпинделя передньої бабки 300 хв^{-1} , тому період хвилястості в часі становив $0,0027 \dots 0,0055 \text{ с}$, що відповідає частоті $182 \dots 370 \text{ Гц}$.

Для аналізу точності оброблення на круглограмах визначена прилегла окружність мінімального діаметра, що описана навколо реального профілю поверхні. Відносно прилеглої окружності визначено усереднені показники (математичне сподівання) відхилень від круглості $m_{\Delta r}$ оброблених шліфуванням поверхонь партії зразків-виробів (рис. 2).

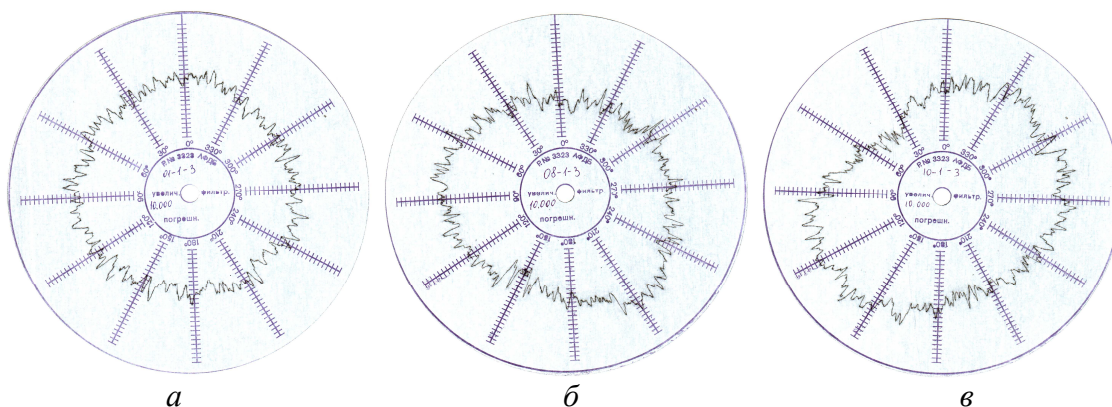


Рис. 1. Типові круглограми оброблених шліфуванням поверхонь зразків-виробів:
а – $\delta_0=20 \text{ мкм}$; б – $\delta_0=30 \text{ мкм}$; в – $\delta_0=40 \text{ мкм}$

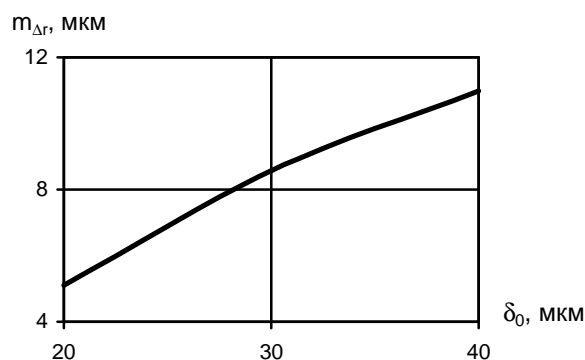


Рис. 2. Математичне сподівання відхилень від круглості $m_{\Delta r}$ поверхонь партії зразків-виробів у функції зазору δ_0 регульованих шпиндельних ГСО

Як видно з графіка (рис. 2), у процесі регулювання радіального зазору δ_0 в бік зменшення усереднені показники (математичне сподівання) відхилення від круглості поверхонь партії зразків-виробів зменшилися більше ніж у 2 рази. Середньоквадратичне значення відхилень від круглості поверхонь партії зразків-виробів при регулюванні зазору δ_0 від 40 мкм до 20 мкм незначно зменшується (в межах 20%).

Частотний склад круглограм партії зразків-виробів встановлювався методами спектрального аналізу контуру оброблених шліфуванням поверхонь. Порівняльний аналіз спектрів, одержаних обробкою трьох груп заготовок при варіюванні величиною δ_0 на торцекруглошліфувальному верстаті ЗТ161 з модернізованою конструкцією шліфувальної бабки, дав можливість визначити вплив ГСО шпинделя на показники точності верстата.

Спектральний аналіз здійснено за результатами математичного опису контуру оброблених поверхонь партії зразків-виробів. Для математичного опису зовнішньої циліндричної поверхні заготовки здійснено її експериментальні виміри на кругломірі з подальшою цифровою обробкою. Дискретні значення ординати перерізу поверхні заготовки виміряно в 4098 точках (через $1,533 \cdot 10^{-3}^\circ$ по куту).

Для опису форми заготовки здійснена інтерполяція дискретних значень ординат контуру перерізу заготовки кубічними сплайнами. Для цього використані вбудовані фун-

кції cspline і interp пакета MathCAD. Круглограми профілю (відповідають круглограмам на рис. 1), одержані сплайн-інтерполяцією дискретних значень профілю зразків-виробів, наведені на рис. 3.

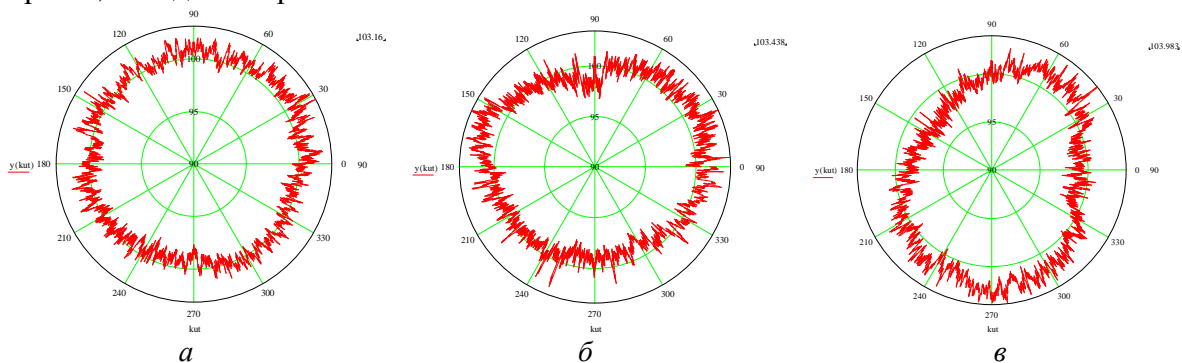


Рис. 3. Опис форми зразків-виробів кубічними сплайнами, які згладжують виміряні дискретні значення ординат контуру зразків-виробів: а – $\delta_0=20$ мкм; б – $\delta_0=30$ мкм; в – $\delta_0=40$ мкм

Виконано математичний опис форми зразків-виробів за допомогою ряду Фур’є, що включає 80 гармонік і відповідає частотному діапазону 0...400 Гц. При цьому форма поперечного перерізу заготовки описана залежністю

$$r(\varphi) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{80} (a_k \cos k\varphi + b_k \sin k\varphi), \tag{1}$$

де a_0, a_k, b_k – коефіцієнти ряду Фур’є, який описує форму заготовки.

Розклад у ряд Фур’є форми зразків-виробів подано у вигляді суми синусоїдальних функцій-складових гармонік розкладу

$$r(\varphi) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{80} A_{mk} \sin(k\varphi + \psi_k), \tag{2}$$

де A_{mk}, ψ_k – амплітуда і початкова фаза k-ї гармоніки.

Коефіцієнти, амплітуди і початкові фази ряду (2) знайдені за допомогою розрахунків за формулами [7]:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} r(\varphi) \cos(k\varphi) d\varphi, \quad b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} r(\varphi) \sin(k\varphi) d\varphi, \quad A_{mk} = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad \psi_k = \arctg \frac{a_k}{b_k}. \tag{3}$$

Знаходження коефіцієнтів ряду Фур’є, амплітуд і початкових фаз гармонік здійснено в програмному середовищі MathCAD. Значення коефіцієнтів ряду, амплітуд і початкових фаз утворюють спектр контуру обробленої поверхні зразка-виробу. На рис. 4 наведено спектр гармонік A_{mk} ряду Фур’є заготовок, які належать до трьох різних груп.

Суттєвими є амплітуди гармонік з номерами до четвертої включно (відповідають частотам до 20 Гц).

З аналізу спектра амплітуд зразка-виробу першої групи ($\delta_0=20$ мкм) випливає, що найбільше значення має перша гармоніка, яка характеризує ексцентриситет контуру обробленої поверхні. У спектрі амплітуд (рис. 4, а) простежується ряд груп гармонік близьких періодів. Це, зокрема, гармоніки з номерами 10, 11, 12 (перша група); 17, 18, 19 (друга група); 35, 36, 37 (третья група); 46, 47, 48 (четверта група). Зазначені групи гармонік відповідають складовим процесу з наявністю биття. Інші гармоніки мають нерегулярні зміни.

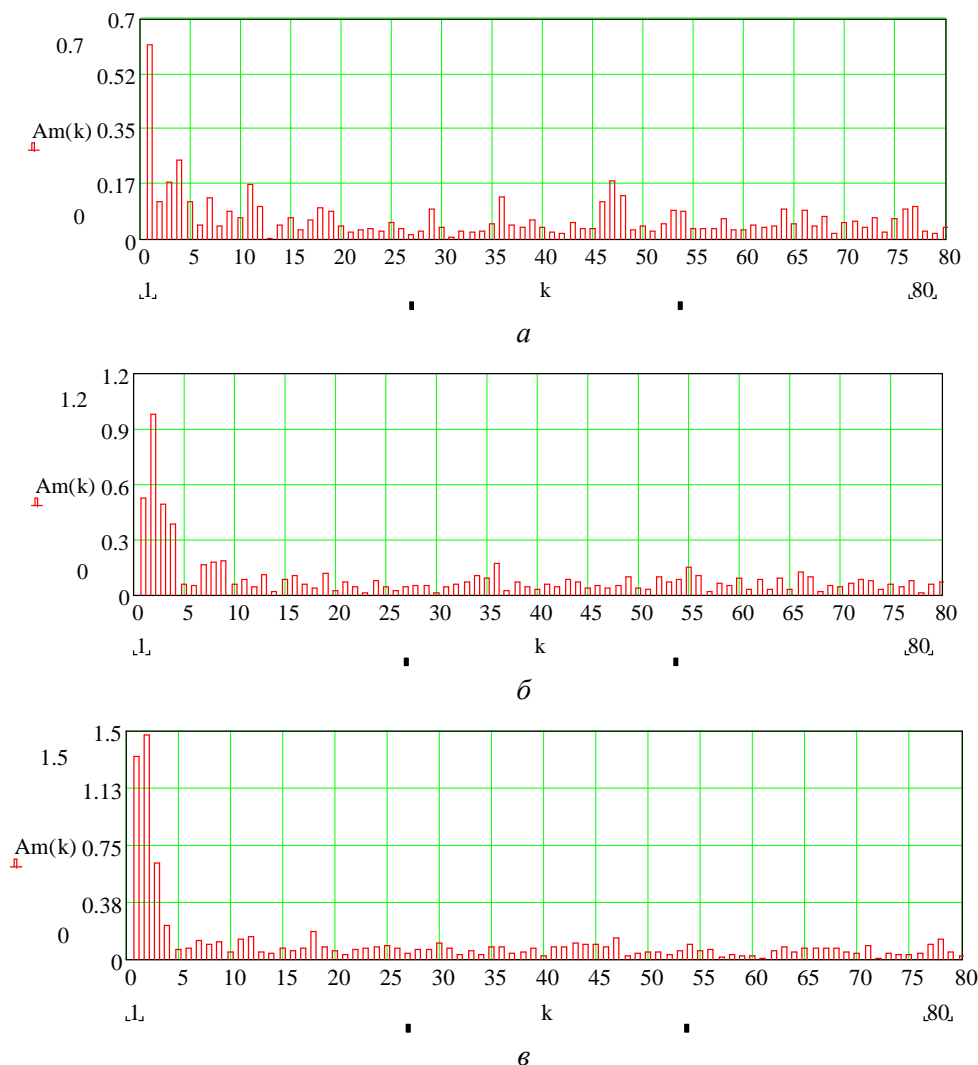


Рис. 4. Спектр амплітуд гармонік зразків-виробів, визначений розрахунком у пакеті MathCAD:

a – $\delta_0=20$ мкм; *б* – $\delta_0=30$ мкм; *в* – $\delta_0=40$ мкм

Спектр зразка-виробу другої групи ($\delta_0=30$ мкм) характеризується зростанням амплітуд його суттєвих гармонік у порівнянні з першою групою, причому найбільшого значення набуває гармоніка номер 2, яка характеризує овальність контуру заготовки (рис. 4, б). Аналогічна тенденція простежується у спектрі амплітуд зразка-виробу третьої групи ($\delta_0=40$ мкм), що характеризується ще більшим зростанням амплітуд суттєвих гармонік.

Статистичним обробленням спектрів партії зразків-виробів отримано математичне сподівання амплітуд суттєвих гармонік для трьох груп заготовок (рис. 5).

Як видно з графіків на рис. 5, зменшення зазору в регульованих ГСО шпинделя сприяє спаданню амплітудних значень всіх суттєвих гармонік спектра. Причому найбільший вплив регулювання величиною δ_0 чинить на амплітуду другої гармоніки.

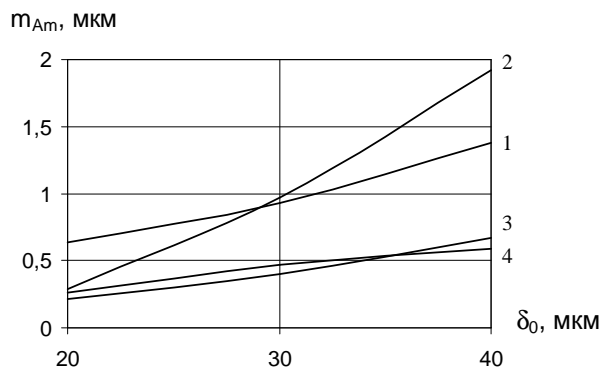


Рис. 5. Математичне сподівання амплітуд суттєвих гармонік m_{Am} поверхонь партії зразків-виробів у функції зазору δ_0 регульованих шпindelних ГСО (номер кривої відповідає номеру гармоніки спектра)

Порівнянням результатів спектрального аналізу зразків-виробів трьох груп встановлено, що верстат із шпindelними регульованими ГСО забезпечує зниження значення амплітуди овальності контуру оброблених поверхонь у 6-7 разів, амплітуд ексцентричності, огранювання контуру – в 2-3 рази. Це пояснюється значним підвищенням жорсткості і демпфування у верстаті, оснащеному регульованими ГСО спеціальної конструкції.

Спектральний аналіз доповнений кореляційним аналізом круглограм оброблених поверхонь зразків-виробів.

Враховуючи попередньо отриману функціональну залежність для відхилень Δr радіальної координати поверхонь зразків-виробів по куту φ , найбільш зручним способом обчислення кореляційної функції $R(\tau)$ є безпосереднє інтегрування випадкової реалізації $\Delta r(t)$ у вигляді

$$R(\tau) = \frac{\int_0^{t-\tau} \Delta r(t) \cdot \Delta r(t+\tau) dt}{t-\tau}, \quad (4)$$

де τ – аргумент кореляційної функції, який визначається як різниця в часі $\tau=t'-t$.

Функція $\Delta r(t)$, яка входить до виразу (4), визначалася з функціональної залежності $\Delta r(\varphi)$ завдяки переводу кута φ в час t при відомій частоті обертання шпинделя 300 хв^{-1} , що відповідає часу одного обороту шпинделя $T_{ш}=0,2 \text{ с}$.

Обчислення визначеного інтеграла у формулі (4) є громіздкою та достатньо довгою операцією. Тому для скорочення часу обчислень засобами MathCAD знаходяться значення кореляційної функції в окремих точках. При цьому формується масив значень v_y функції $R(\tau)$ та масив v_x дискретних значень аргументу функції τ . Наприклад, для круглограми, наведеної на рис. 1, а, зазначені масиви в пакеті мають MathCAD вигляд

```
vy:= (0.581 0.224 0.175 0.139 0.126 0.051 0.027 0.008 -0.038 -0.055 -0.121 -0.133 -0.211 -0.195 -0.15 -0.018 0.048 0.09 -0.012 -0.018 0.048)
vx:= (0 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.1 0.11 0.12 0.13 0.14 0.15 0.16 0.17 0.18 0.19 0.2)
```

З метою одержання згладженої залежності здійснена інтерполяція отриманих дискретних значень кубічними сплайнами. На рис. 6, а наведена отримана залежність у графічному вигляді, що являє собою кореляційну функцію випадкового процесу відхилень $\Delta r(t)$ ординати круглограми.

За аналогічною методикою побудовані графіки на рис. 7, які визначають кореляційну функцію круглограм на рис. 1, б, в.

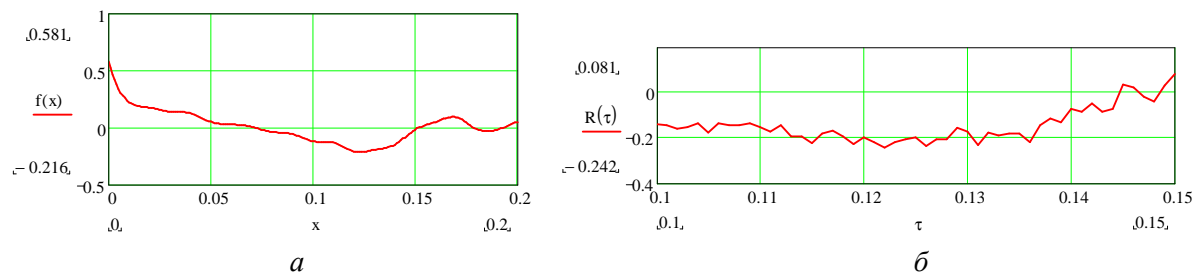


Рис. 6. Кореляційна функція круглограми обробленої поверхні при $\delta_0=20$ мкм у регульованих ГСО шпинделя, визначена засобами пакета MathCAD (графіки на рис. а, б визначають кореляційну функцію в різних масштабах по осі абсцис)

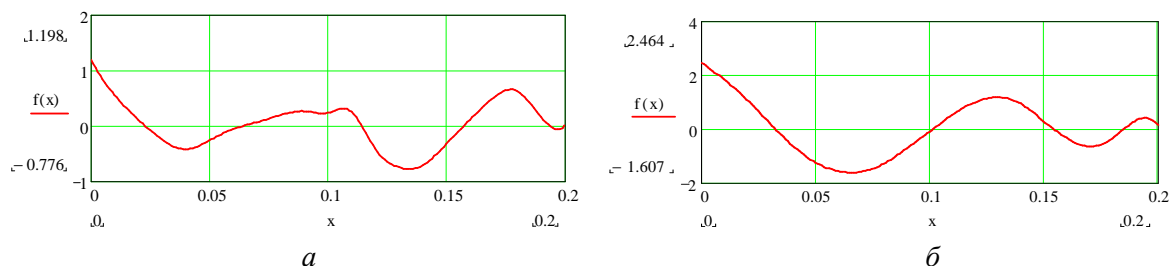


Рис. 7. Кореляційні функції круглограм оброблених поверхонь зразків-виробів, визначені засобами пакета MathCAD: а – $\delta_0=30$ мкм; б – $\delta_0=40$ мкм

Кореляційна функція круглограми поверхні, обробленої при $\delta_0=20$ мкм у ГСО, має тенденцію більш різкого зниження, ніж кореляційні функції круглограм поверхонь, оброблених при $\delta_0=30, 40$ мкм. Кореляційна функція має довгоперіодичну складову приблизно 0,17 с, а також короткоперіодичні – в межах 0,002...0,005 с (рис. 6, б), що відповідають періоду хвилястості круглограм.

На графіках кореляційних функцій (рис. 7) простежуються дві довгоперіодичні складові з періодами $T_1=0,11...0,13$ с та $T_2=0,17...0,19$ с. Це обумовлюється впливом як ексцентричності контуру з періодом $T_2 \approx T_{ш}$, так і овальності контуру оброблених поверхонь з періодом $T_1 \approx T_{ш}/2$. Зазначене явище чітко простежується на відповідних круглограмах (рис. 1) та спектрах (рис. 4). Наявність у кореляційній функції круглограми поверхні, обробленої при $\delta_0=20$ мкм, довгоперіодичної складової з періодом $T \approx T_{ш}$ свідчить про ефективне зменшення періодичної складової, пов'язаної з овальністю контуру поверхні, яка на графіку рис. 6, а не простежується.

Висновки. У результаті проведеного аналізу точності оброблення показано, що регульовані ГСО шпинделя є ефективним засобом підвищення точності оброблення на верстатах. Встановлено, що регулювання величиною зазору δ_0 в ГСО дозволяє підвищити точність оброблення деталей різанням у 2,2 рази за показником відхилень від круглості зразків-виробів.

За результатами спектрального та кореляційного аналізу точності оброблення встановлено, що регульована ГСО є фільтром низьких частот, яка добре гасить коливання високих гармонік спектра. Найбільший вплив регулювання величиною зазору δ_0 чинить на амплітуду другої гармоніки спектра, що визначає овальність контуру обробленої різанням поверхні деталі.

Перспективним напрямом подальших досліджень стосовно аналізу точності верстатів на шпиндельних опорах ковзання є встановлення статистичних закономірностей формування точності оброблення залежно від вихідних параметрів опор шпинделя.

Список використаних джерел

1. *Детали и механизмы металлорежущих станков* / [В. В. Каминская, З. М. Левина и др.] ; под ред. Д. Н. Решетова. – М. : Машиностроение, 1972. – 519 с. – (Шпиндели и их опоры, механизмы и детали приводов; т. 2).

2. *Решетов Д. Н.* Точность металлорежущих станков / Д. Н. Решетов, В. Т. Портман. – М. : Машиностроение, 1986. – 337 с.
3. *Базров Б. М.* Технологические основы проектирования самоподнастраивающихся станков / Б. М. Базров. – М. : Машиностроение, 1978. – 216 с.
4. *Балакшин Б. С.* Адаптивное управление станками / Б. С. Балакшин. – М. : Машиностроение, 1973. – 688 с.
5. *Юркевич В. В.* Точность токарной обработки / В. В. Юркевич, А. В. Соколов // Машиностроитель. – 2001. – № 11. – С. 22-30.
6. *Юркевич В. В.* Методы испытаний обрабатывающих станков / В. В. Юркевич // Машиностроитель. – 2006. – № 10. – С. 30-39.
7. *Струтинський В. Б.* Математичне моделювання процесів та систем механіки / В. Б. Струтинський. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 612 с.
8. *Струтинський В. Б.* Математичне моделювання металорізальних верстатів / В. Б. Струтинський, П. П. Мельничук. – Житомир : ЖІТІ, 2002. – 572 с.
9. *Станки металлорежущие.* Общие требования к испытаниям на точность: ГОСТ 8-82. – [Действ. от 1983-07-01]. – М. : Издательство стандартов, 1983. – 11 с.
10. *Регульовані гідростатичні підшипники для шпиндельних вузлів* / Ю. О. Сахно, Д. Ю. Федориненко, С. В. Бойко, В. С. Волик. – Ніжин : Аспект-Поліграф, 2009. – 172 с.
11. *Струтинський В. Б.* Статистична динаміка шпиндельних вузлів на гідростатичних опорах : монографія / В. Б. Струтинський, Д. Ю. Федориненко. – Ніжин : Аспект-Поліграф, 2011. – 464 с.
12. *Станки металлорежущие.* Образцы-изделия для проверки точности обработки. Общие технические требования: ГОСТ 25443-82. – [Действ. от 1982-09-09]. – М. : Издательство стандартов, 1983. – 5 с.