

# ГЕОТЕХНІЧНА І ГІРНИЧА МЕХАНІКА, МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.941.08

Д.Ю. Федориненко, д-р техн. наук, доц.,  
С.П. Сапон, канд. техн. наук,  
О.П. Космач, канд. техн. наук,  
С.В. Бойко, канд. техн. наук, доц.

Чернігівський національний технологічний університет,  
м. Чернігів, Україна, e-mail: s.sapon@gmail.com

## ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАЄКТОРІЙ ШПИНДЕЛЯ НА ГІДРОСТАТИЧНИХ ОПОРАХ

D. Fedorynenko, Dr. Sci. (Tech.), Associate Prof.  
S. Sapon, Cand. Sci. (Tech.)  
O. Kosmach, Cand. Sci. (Tech.)  
S. Boyko, Cand. Sci. (Tech.), Associate Prof.

Chernihiv National University of Technology, Chernihiv,  
Ukraine, e-mail: s.sapon@gmail.com

## INFORMATION-MEASURING COMPLEX FOR RESEARCH SPINDLE TRAJECTORIES WITH HYDROSTATICAL BEARINGS

**Мета.** Підвищення точності визначення параметрів траєкторій руху шпинделя на гідростатичних опорах (ГСО) на основі використання високоточних триангуляційних лазерних датчиків положення та засобів цифрової обробки сигналів.

**Методика.** Для експериментального дослідження закономірностей формування точності шпиндельного вузла за показником точності траєкторій переміщення шпинделя застосовано метод траєкторій з використанням високоточних сучасних засобів вимірювання та цифрових засобів обробки інформації. Оцінювання параметрів траєкторій руху шпинделя здійснене за статистичними характеристиками величини радіус-вектора. Аналіз частотного складу траєкторій шпинделя здійснене із застосуванням методу спектрального аналізу.

**Результати.** Розроблено інформаційно-вимірювальний комплекс для дослідження траєкторій шпинделя на основі застосування високоточних сучасних засобів вимірювання та цифрової обробки сигналів. Запропонована методика експериментального дослідження траєкторій переміщення шпинделя на ГСО, що дозволяє з високою точністю визначати статистичні характеристики точності шпиндельного вузла за одночасного впливу технологічних навантажень, тиску та температури мастила в ГСО. Застосування запропонованої методики дозволило встановити яскраво виражений стохастичний характер траєкторій руху шпинделя на ГСО, особливо за порівняно невеликого гармонійного навантаження. Наведені результати аналізу показників точності обертання шпинделя залежно від експлуатаційних параметрів ГСО.

**Наукова новизна.** Встановлені статистичні характеристики траєкторій шпинделя та їх вплив на формування показників точності шпиндельного вузла залежно від експлуатаційних параметрів ГСО та технологічних навантажень.

**Практична значимість.** Запропонована методика дослідження точності траєкторій переміщення шпинделя на базі сучасного прецизійного інформаційно-вимірювального комплексу може бути використана для аналізу точності широкої номенклатури обертових вузлів технологічного обладнання.

**Ключові слова:** шпиндель, точність, траєкторія, лазерний датчик, гідростатична опора

**Постановка проблеми.** Точність робочих рухів формують вузлів технологічного обладнання безпосередньо впливає на показники точності обробленої деталі. Одним з основних вихідних параметрів точності верстатів є траєкторія обертання шпинделя. Результати експериментальних досліджень по-

казують, що на шпиндельний вузол припадає 50–80% сумарної похибки металорізального верстата. Відповідно до цього, однією з головних задач оцінки ефективності роботи шпиндельного вузла є точне визначення траєкторії його обертання. Основою методичного підходу до визначення точності обертання шпинделя є оцінка характеристик траєкторій визначених фіксованих точок, розташованих на допоміжних базах шпинделя, що визначають положення заготовки,

пристрою або інструменту. Проте, не завжди наявні засоби вимірювання дозволяють провести безпосереднє визначення положення названих точок.

Зазначені обставини зумовили до широкого застосування методик визначення точності обертання шпинделя з використанням контрольних оправок, сфер тощо [1–3]. Шпинделі сучасних прецизійних верстатів забезпечують високу точність обертання, порівняну з точністю контрольного оснащення. Тому, при дослідженнях точності шпиндельних вузлів постає актуальна проблема підвищення точності вимірювальних засобів, побудова вимірювальної системи та розробки методик, що дозволяють підвищити точність експериментального визначення характеристик траєкторій шпинделя.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Сучасні методики контролю точності обертання прецизійних шпинделів базуються на безконтактному вимірюванні лінійних зміщень по еталонних поверхнях вимірювальної оправки [1–3]. У МДГУ „СТАНКІН“ Юркевичем В.В. створена система експериментальних досліджень траєкторій формоутворення на токарних верстатах [4]. В якості безконтактних датчиків переміщення використовувалися вихреструмкові датчики серії АЕ2Х з частотним діапазоном до 1000 Гц, похибкою вимірювання в межах 3 мкм при 20°С. Відмічена методика не може бути використана для аналізу точності шпиндельних вузлів з ГСО, де величина радіального биття шпинделя знаходиться в межах одного мікрометра.

При дослідженні точності обертання високошвидкісних шпинделів із застосуванням ємнісних датчиків [5, 6] та методу віброакустичної емісії [7] для побудови траєкторій сигнал потребує попереднього перетворення, що не забезпечує максимальну адекватність відтворення переміщень шпинделя, особливо високочастотних складових вібраційного сигналу, які характеризують шорсткість обробленої поверхні.

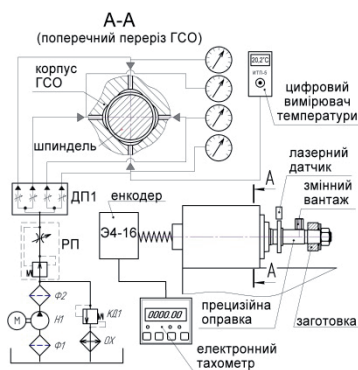
**Виділення невирішеної раніше частини загальної проблеми.** Таким чином, рівень існуючих методик дослідження точності обертання шпинделів визначається типом вимірювальних засобів, принципами вимірювання, ступенем автоматизації, чутливістю засобів вимірювання та трудомісткістю процесу контролю.

Сучасні прецизійні верстати здатні розвивати частоту обертання шпинделя понад 20000 хв<sup>-1</sup> та точність центрування шпинделя під дією навантаження з боку процесу різання в межах 0,1–0,5 мкм. Ураховуючи постійне зростання вимог до точності обробки та існуючі тенденції розвитку сучасних засобів вимірювання й контролю, актуальною є задача розробки методик визначення точності формоутворюючих рухів металорізальних верстатів із застосуванням високочастотних, швидкодіючих засобів вимірювання.

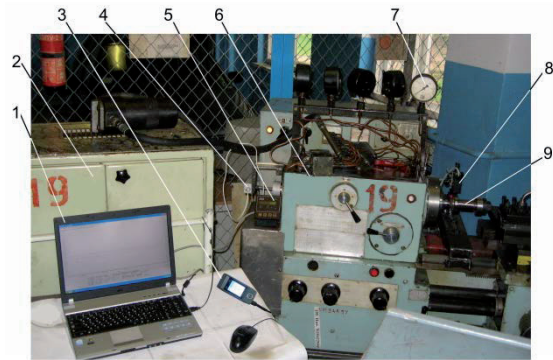
**Мета роботи.** Підвищення точності експериментального дослідження параметрів траєкторій переміщення шпинделя на ГСО на основі використання інформаційно-вимірювального комплексу із застосуванням високочастотних триангуляційних лазерних датчиків положення та засобів цифрової обробки сигналів.

**Виклад основного матеріалу.** В основу методичного підходу до експериментального дослідження точності шпиндельного вузла з ГСО покладено оцінку статистичних показників траєкторій переміщення шпинделя у площині, перпендикулярній до його осі обертання та подальший спектральний аналіз траєкторій. Такий підхід дозволяє встановити параметри траєкторій, що визначають точність лінійних розмірів, відхилення форми, хвилястість, шорсткість оброблених поверхонь.

Для дослідження траєкторій шпинделя на ГСО було застосовано інформаційно-вимірювальний комплекс засобів експериментальних досліджень, що реалізований у вигляді експериментального стенду на базі прецизійного токарного верстата моделі УТ16А (рис. 1).



а



б

Рис.1. Структурна схема (а) та загальний вигляд (б) інформаційно-вимірювального комплексу засобів експериментальних досліджень точності шпиндельного вузла на регульованих ГСО: 1 – ноутбук; 2 – гідростанція; 3 – вимірювач температури; 4 – енкодер; 5 – електронний тахометр; 6 – токарний верстат УТ16А; 7 – манометр; 8 – лазерний датчик; 9 – прецизійна оправка; ДП1 – подільник потоку; РП – регулятор потоку; Н1 – насос; Ф1, Ф2 – фільтри грубої та тонкої очистки; КД1 – клапан; ОХ – охолоджувач мастила

Верстат УТ16А має можливість безступінчастого регулювання частоти обертання шпинделя, числове значення якої фіксувалось за показаннями спеціалізованого

електронного тахометра Б-ТМ-НП1210-СК03-ІВ5ВА-І, що визначає частоту обертання шпинделя з точністю ±0,05 хв<sup>-1</sup> за частотою електричних імпульсів, що надхо-

дять від енкодера 4 (рис.1), з'єднаного через пружину з шпинделем верстата. Для ґрунтового аналізу робочих процесів, що виникають при обертанні шпинделя одночасно з вимірюванням траєкторій шпинделя, проводилася реєстрація допоміжних показників, таких як температура в передній ГСО та питомий тиск в опорах. Вимірювання температури мастила в кармані передньої ГСО здійснювали з точністю до 0,1°C цифровим вимірювачем температури моделі ИТП-5-2УН-TFT1. Тиск у карманах ГСО шпинделя встановлювали за допомогою регулятора потоку РП дросельного типу, а контролювали манометрами з точністю 0,1 МПа.

Для визначення зміщень шпинделя  $\Delta x$  та  $\Delta y$  у поперечно-вертикальній площині, перпендикулярній осі його обертання, використовувалися триангуляційні лазерні датчики моделі РФ603.2-10/2-485-U-IN-AL-CG (рис. 2, а), робочий діапазон яких становить 2 мм, лінійність  $\pm 2$  мкм, роздільна здатність 0,2 мкм, максимальна частота дискретизації  $f_0 = 9,4$  кГц. Датчики 2 закріплювалися під кутом  $90^\circ$  на стійці 3 і у процесі вимірювань взаємодіяли з контрольним пояском прецизійної оправки 1 (рис. 2, б), яку встановлювали в конічному отворі шпинделя верстата.

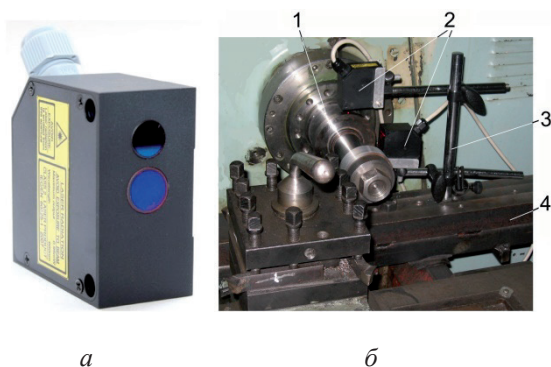


Рис.2. Триангуляційний лазерний датчик (а) та загальний вигляд (б) схеми закріплення: 1 – прецизійна оправка; 2 – датчики; 3 – стійка; 4 – плита

З метою мінімізації систематичної складової похибки обертання шпинделя, обумовленої відхиленнями форми контрольного пояска прецизійної оправки, тонку обробку контрольного пояска прецизійної оправки проводили на даному верстаті, а після обробки оправка залишалася незмінно закріпленою в шпинделі протягом виконання всієї серії експериментальних досліджень. Це дало змогу забезпечити радіальне биття контрольного пояска в межах 1,0 мкм.

Реєстрація сигналів з лазерних датчиків здійснювалася за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) на базі цифрового осцилографа через шину RS 232 (рис. 3). З'єднання АЦП з персональним комп'ютером (ПК) здійснювалося за допомогою usb інтерфейсу. Розроблене програмне забезпечення на базі операційної системи Windows дозволяє проводити реєстрацію, зберігання, перетворення вхідних сигналів з подальшим виведенням на дисплей ПК у вигляді часових графічних залежностей у режимі реального часу.

Перед початком кожної серії експериментів визначалось початкове положення в горизонтальному  $x_0$  та вертикальному  $y_0$  напрямках точки відбиття лазерного про-

меня кожного з датчиків відносно початку робочого діапазону  $S$

$$x_0 = \frac{U_{0x}}{U_{max}} \cdot S; \quad y_0 = \frac{U_{0y}}{U_{max}} \cdot S,$$

де  $U_{0x}, U_{0y}$  – середньоарифметичні значення сигналу з лазерного датчика при нерухомому положенні шпинделя та тиску в гідростатичних опорах, передбаченому планом експерименту,  $U_{max}$  – максимальне значення вихідного сигналу з лазерного датчика,  $U_{max} = 10$  В;  $S$  – діапазон вимірювання лазерних датчиків,  $S = 2$  мм.

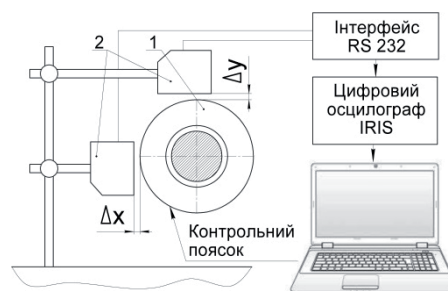


Рис. 3. Структурна схема вимірювання траєкторій шпинделя: 1 – прецизійна оправка; 2 – лазерні датчики

Відповідно до плану проведення експерименту відбувалося налаштування верстата та проводилася обробка зразків з фіксацією лазерними датчиками на визначеному проміжку часу дискретного набору значень зміщень шпинделя. Зміщення осі шпинделя у двох перпендикулярних площинах у лінійних величинах визначалося відповідно до наступних виразів

$$\Delta x_i = \frac{U_{xi}}{U_{max}} \cdot S - x_0; \quad \Delta y_i = \frac{U_{yi}}{U_{max}} \cdot S - y_0,$$

де  $U_{xi}, U_{yi}$  – дискретні значення сигналу з датчиків, В.

На рис. 4 представлено типову осцилограму коливань шпинделя в напрямку осі  $Ox$ .

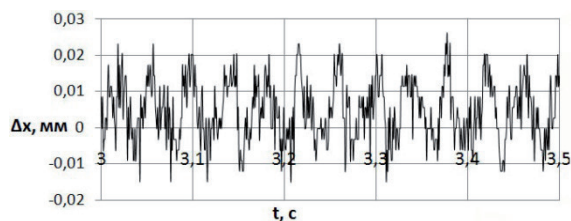


Рис. 4. Фрагмент реалізації випадкового процесу зміщень осі шпинделя в напрямку осі  $Ox$

Частота дискретизації  $f_0$  цифрового вимірювального комплексу, що встановлювалася при налагодженні АЦП, визначалася у відповідності до методики [8] за виразом

$$f_0 > a \cdot f_m \frac{2,2}{\sqrt{\epsilon_n}},$$

де  $a$  – коефіцієнт, що визначає частину спектру вхідного сигналу на частотах вищих за  $f_m$ , впливом якої на відтворений дискретний сигнал нехтують;  $\varepsilon_n$  – відносна помилка відновлення неперервного аналогового сигналу за дискретною копією.

Величина  $a$  вказує на відносне значення амплітуди (у порівнянні з максимальною у спектрі), за якої частоти вищі за  $f_m$  мало впливають на вхідний сигнал. Значення помилки відновлення аналогового сигналу при проведенні експериментальних досліджень становить 1% ( $\varepsilon_n = 0,01$ ).

Варіювання частотою обертання шпинделя відповідно до плану експерименту забезпечувало різну тривалість обробки зразків. Тому, для забезпечення однакової кількості вимірювань за один оберт шпинделя, у процесі проведення експериментів частоту дискретизації сигналу на АЦП змінювали пропорційно частоті обертання шпинделя в межах  $f_\delta = 200\text{--}2500$  Гц, з розрахунку забезпечення кожним датчиком 50 вимірювань за 1 оберт шпинделя. Така точність побудови траєкторій дозволяє встановити їх статистичні характеристики при варіюванні експлуатаційними параметрами ГСО шпинделя та дії технологічного навантаження.

Відмінною особливістю запропонованої методики є застосування високих частот дискретизації сигналів, що дозволило виявити нові фізичні явища в досліджуваному процесі.

На рис. 5 наведено експериментальні траєкторії трьох обертів шпинделя, що побудовані за результатами вимірювань з частотами дискретизації  $f_\delta = 200$  та  $f_\delta = 2000$  Гц за величин статичного дисбалансу  $D_{cm} = 6525$  г·мм (рис. 5, а, б) та  $D_{cm} = 2200$  г·мм (рис. 5, в, з). Випадковий характер траєкторій свідчить про доцільність забезпечення високої частоти дискретизації АЦП (рис. 5, а, в), що дозволяє виявити їх виражений стохастичний характер і свідчить про складну природу процесів, що відбуваються у ГСО, і, перш за все, у мастильному шарі. Особливо складний характер траєкторій шпинделя проявляється за порівняно невеликого гармонічного навантаження (рис. 5, в), пояснюється впливом на форму траєкторій шпинделя похибок форми, пружних, температурних деформацій опорних поверхонь ГСО, випадкового характеру експлуатаційних параметрів ГСО та технологічних навантажень тощо. Наявність у траєкторіях петлеподібних рухів свідчить про прояв нелінійності реакцій мастильного шару в опорі за дії нестационарного зовнішнього навантаження, що може викликати прояв таких небажаних явищ як, наприклад, дрібно-швидкісний вихор.

Стохастичний характер траєкторій практично унеможливує визначення таких вихідних параметрів, як різниця між максимальним  $\Delta K_{max}$  і мінімальним  $\Delta K_{min}$  відхиленням від правильної форми траєкторії, що характеризує числове значення відхилення від форми обробленої поверхні зразка, розмах траєкторії, за яким визначається точність розміру оброблюваної поверхні. Тому оцінювання параметрів траєкторій руху шпинделя здійснено за статистичними характеристиками радіус-вектора  $R$ : математичним сподіванням  $m_R$ , середньоквадрати-

чним відхиленням  $\sigma_R$ , асиметрією  $A_R$  та ексцесом  $E_R$  розподілу величини радіус-вектора траєкторій.

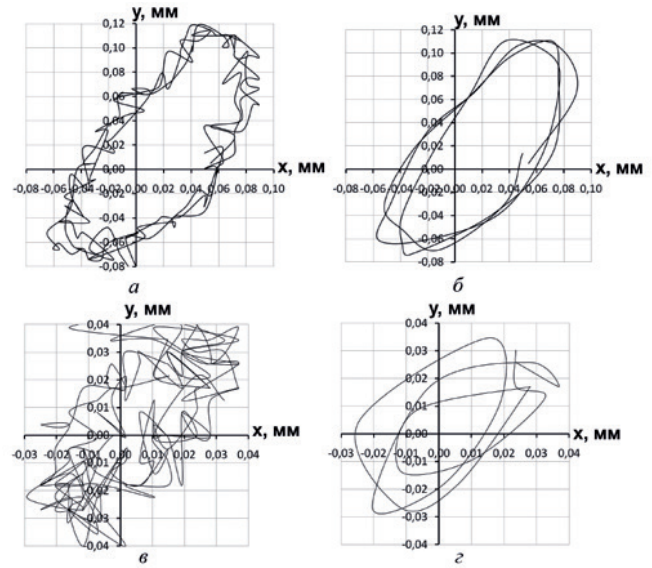


Рис. 5. Траєкторії шпинделя при наявності зовнішнього гармонічного навантаження, побудовані за різної частоти дискретизації: а –  $f_\delta = 2000$  Гц,  $D_{cm} = 6525$  г·мм; б –  $f_\delta = 200$  Гц,  $D_{cm} = 6525$  г·мм; в –  $f_\delta = 2000$  Гц,  $D_{cm} = 2200$  г·мм; з –  $f_\delta = 200$  Гц,  $D_{cm} = 2200$  г·мм

Математичне сподівання  $m_R$  величини радіус-вектора траєкторій визначає зміщення шпинделя в системі координат  $XOY$  за дії технологічних навантажень та експлуатаційних параметрів ГСО, характеризує відхилення від номінального розміру оброблюваної поверхні.

Середньоквадратичне відхилення  $\sigma_R$  радіус-вектора траєкторій дає змогу оцінити розсіювання положення шпинделя під дією технологічних навантажень та експлуатаційних параметрів ГСО шпинделя, впливає на допуск радіального розміру обробленої поверхні.

Асиметрія  $A_R$  та ексцес  $E_R$  визначають скошеність та крутість кривої розподілу величини радіус-вектора траєкторій, характеризують ступінь наближеності кривої розсіювання положень радіус-вектора до нормального закону розподілу.

Для кожної реалізації експерименту проводилося визначення статистичних показників траєкторій, яке здійснювали за результатами вимірювання зміщень шпинделя шляхом формування трьох вибірок об'ємом 500 дискретних значень положення шпинделя, що відповідає його 10-ти повним оборотам, що задовольняє рівню значимості  $\alpha = 0,05$  при відносній похибці визначення математичного сподівання  $\Delta_m = 0,01$  [9].

Після цього проводилося обчислення відносної похибки визначення величини радіус-вектора траєкторій  $\Delta_R$  для кожної реалізації експерименту, величина якої загалом не перевищувала 7,7%.

Гармонічний аналіз траєкторій руху шпинделя здійснювався за дискретними значеннями радіус-вектора згідно з виразом  $R_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}$ .

Для аналітичного опису реалізації радіус-вектора  $R$ , використовувалася інтерполяція дискретних значень кубічними сплайнами. Сукупність траєкторій, що відповідає одному та 10 обортам шпинделя, побудована в полярній системі координат за результатами сплайн-інтерполяції дискретних значень радіус-вектора, наведена на рис. 6. Спектральний аналіз траєкторій здійснено за результатами математичного опису їх форми рядом Фур'є згідно із загальноприйнятими методиками [10].

Значення амплітуд гармонічних складових траєкторій шпинделя за принципом суперпозиції утворювали спектр зареєстрованого сигналу.

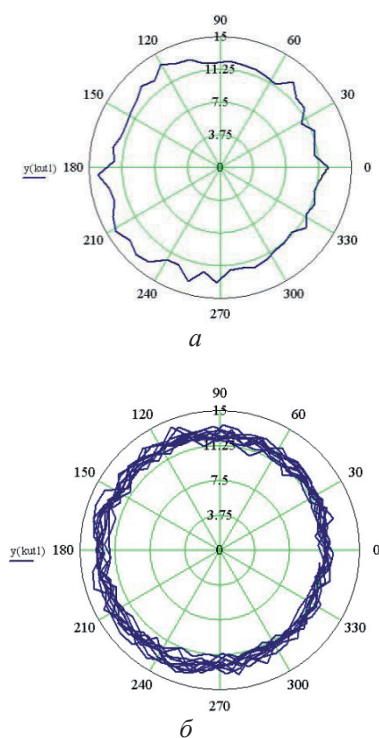


Рис. 6. Траєкторії одного (а) та десяти (б) обортів шпинделя, побудовані в полярній системі координат за результатами сплайн-інтерполяції дискретних значень радіус-вектора  $R$

На рис. 7 наведено в різних масштабах спектр математичних сподівань амплітуд  $Am(k)$  гармонік траєкторій шпинделя при частоті обертання  $n = 1500 \text{ хв}^{-1}$  та тиску  $p = 2 \text{ МПа}$ .

Величина математичного сподівання амплітуд  $Am(k)$  гармонік показує вплив поперечних коливань шпинделя з певною частотою на ексцентриситет та відхилення форми контуру обробленої поверхні деталі [10].

Спектральний аналіз траєкторій радіус-вектора шпинделя дозволяє здійснювати обґрунтований вибір раціональних режимів прецизійної обробки, експлуатаційних параметрів шпиндельних ГСО для забезпечення регламентованих показників точності оброблюваних деталей.

Встановлено, що траєкторії руху шпинделя на ГСО, особливо за порівняно невеликого гармонічного навантаження, мають стохастичний характер, що обумовлює доцільність застосування ймовірнісного підходу до оцінювання параметрів траєкторій одночасно із забезпе-

ченням високої частоти дискретизації виміральної апаратури.

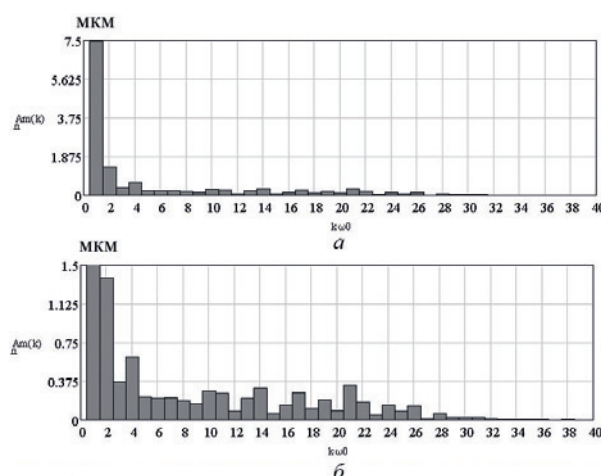


Рис. 7. Спектр амплітуд гармонік траєкторій шпинделя при  $p=2 \text{ МПа}$  для масштабу 1:1 (а) та для масштабу 5:1 (б)

Перспективними напрямками подальших досліджень є виявлення та дослідження впливу на точність обробки процесів, що відбуваються в мастильному шарі, а також встановлення статистичних характеристик поперечно-кутової жорсткості ГСО на основі запропонованої методики вимірювання.

**Висновки та перспективи розвитку напрямку.** Розроблений універсальний інформаційно-вимірвальний комплекс, що дозволяє з точністю 0,2 мкм здійснювати вимірювання радіальних коливань шпинделя та визначати з точністю 0,1 МПа питомий тиск, з точністю до 0,1°C температуру мастила в карманах ГСО, з точністю  $\pm 0,05 \text{ хв}^{-1}$  частоту обертання шпинделя.

Запропоновано методику експериментального дослідження точності шпиндельного вузла за показником точності переміщення шпинделя, що дозволяє встановити статистичні характеристики параметрів траєкторії шпинделя залежно від експлуатаційних параметрів шпиндельних ГСО та технологічних навантажень.

#### Список літератури / References

1. Charles Wang (2001), "A new laser non-contact method for the measurement of spindle error motion", *Proceedings of ASPE: Summer Topic Meeting*, State College, PA June 18–19, 2001, pp. 750–762.
2. Юркевич В.В. Методы испытаний обрабатывающих станков / В.В. Юркевич // *Машиностроитель* – 2006. – №10. – С. 30–39.
3. Юркевич В.В. Испытания, контроль и диагностика металлообрабатывающих станков: монография / Юркевич В.В., Схиртладзе А.Г., Борискин В.П. – Старый Оскол: ООО „ТНТ“, 2006. –552 с.
4. Yurkevich, V.V., Skhirtladze, A.G. and Boriskin, V.P. (2006), *Ispytaniya, kontrol i diagnostika metalloobrabatyvayushchikh stankov* [Testing, Control and Diagnostics of Metal-Working Machines], ООО "TNT", Stary Oskol, Russia.

4. Юркевич В.В. Экспертная система для токарной обработки / В.В. Юркевич // Вестник машиностроения – 2010. – №6. – С.73–76.

Yurkevich, V.V. (2010), “Expert system for turning”, *Vestnik Mashinostroeniya*, no. 6, pp. 73–76.

5. Космынин А.В. Анализ точности вращения высокоскоростных шпинделей с газостатическими опорами / А.В. Космынин, С.П. Чернобай // СТИН. – 2006. – №6. – С.10–13.

Kosmynin, A.V. and Chernobay, S.P. (2006), “Analysis of rotation accuracy of high-speed spindles with gasostatic bearings”, *STIN*, no. 6, pp. 10–13.

6. Ashok, S.D. and Samuel, G.L. (2010), “Regression method for identifying spindle radial errors of a miniaturized machine tool”, *Journal of Studies on Manufacturing*, Vol. 1, Issue 1, pp. 26–33.

7. Контроль положения шпинделя на газостатических опорах методом виброакустической эмиссии / А.С. Хвостиков, А.В. Космынин, В. С. Щетинин [и др.] // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2012. – № 9 (145). – С.134–137.

Khvostikov, A.S., Kosmynin, A.V., Shchetinin, V.S., Smirnov, A.V. and Blinkov, S.S. (2012), “The control of the spindle on gasostatic bearing by the method of vibration acoustic issue”, *Vestnik Orenburgskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, no. 9(145), pp. 134–137.

8. Петраков Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням / Петраков Ю.В. – К.: УкрНДІАТ, 2003. – 383 с.

Petrakov, Yu.V. (2003), *Avtomatychne upravlinnia prosesamy obrobky materialiv rizanniam* [Automatic Control over Materials Cutting Processes], UkrNDIAT, Kyiv, Ukraine.

9. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник; 2-е изд., испр. и доп. / Степнов М.Н., Шаврин А.В. – М.: Машиностроение, 2005. – 399 с.

Stepnov, M.N. and Shavrin, A.V. (2005), *Statisticheskie metody obrabotki rezultatov mekhanicheskikh ispytaniy: spravochnik*. [Statistical Methods for the Mechanical Testing Results Processing], Mashinostroenie, Moscow, Russia.

10. Струтинський В.Б. Статистична динаміка шпиндельних вузлів на гідростатичних опорах: монографія / Струтинський В.Б., Федориненко Д.Ю. – Ніжин: ТОВ „Видавництво „Аспект-Поліграф”, 2011. – 464 с.

Strutynskiy, V.B. and Fedorynenko, D.Yu. (2011), *Statystychna dynamika shpyndelnykh vuzliv na hidrostatychnykh oporakh* [Statistical Dynamics of Spindle Units for Hydrostatic Bearings], TOV Vydavnytstvo Aspekt-Poligraf, Nizhyn, Ukraine.

**Цель.** Повышение точности определения параметров траекторий движения шпинделя на гидростатических опорах (ГСО) на основе использования высокоточных триангуляционных лазерных датчиков положения и средств цифровой обработки сигналов.

**Методика.** Для экспериментального исследования закономерностей формирования точности шпиндельного узла по показателю точности траекторий перемещения шпинделя применен метод траекторий с использо-

ванием высокоточных современных средств измерения и цифровых средств обработки информации. Оценка параметров траекторий движения шпинделя осуществлена по статистическим характеристикам величины радиус-вектора. Для анализа частотного состава траекторий шпинделя применен метод спектрального анализа.

**Результаты.** Разработан информационно-измерительный комплекс для исследования траекторий шпинделя на основе применения высокоточных современных средств измерения и цифровой обработки сигналов. Предложена методика экспериментального исследования траекторий перемещения шпинделя на ГСО, которая позволяет с высокой точностью определять статистические характеристики точности шпиндельного узла при одновременном воздействии технологических нагрузок, давления и температуры масла в ГСО. Применение предложенной методики позволило установить ярко выраженный стохастический характер траекторий движения шпинделя на ГСО, особенно при сравнительно небольшой гармонической нагрузке. Приведены результаты анализа показателей точности вращения шпинделя в зависимости от эксплуатационных параметров ГСО.

**Научная новизна.** Установлены статистические характеристики траекторий шпинделя и их влияние на формирование показателей точности шпиндельного узла в зависимости от эксплуатационных параметров ГСО и технологических нагрузок.

**Практическая значимость.** Предложенная методика исследования точности траекторий перемещения шпинделя на базе современного прецизионного информационно-измерительного комплекса может быть использована для анализа точности широкой номенклатуры вращающихся узлов технологического оборудования.

**Ключевые слова:** шпиндель, точность, траектория, лазерный датчик, гидростатическая опора

**Purpose.** To increase the accuracy of determination of the parameters of movement trajectories of the spindle on hydrostatic bearings, based on the use of high-precision laser triangulation position sensors and digital signal processing.

**Methodology.** For the experimental research of regularities of the spindle block accuracy formation in terms of the accuracy trajectories movement of the spindle, the method of trajectories with modern, high-precision means of measurement and digital information processing has been used. The parameters of the spindle movement trajectories were estimated by statistical descriptions of magnitude the radius vector. The frequency content of trajectories of the spindle was analyzed by the method of spectral analysis.

**Findings.** Based on the application of modern high-precision measuring tools and digital signal processing, we have developed the information-measuring complex for the research on trajectories of the spindle. The methodology of experimental research on movement trajectories of the spindle with hydrostatic supports has been proposed. The methodology allows us to determine statistical descriptions of the accuracy of the spindle block with high accuracy under the simultaneous impact of technological loads, pressure and oil temperature in hydrostatic supports. The application of the

proposed methodology allowed us to establish the clear stochastic character of movement trajectories of the spindle with hydrostatic supports, especially under relatively small harmonic load. The results of the analysis of indicators accuracy of spindle rotation, depending on the operating parameters of the hydrostatic supports are presented.

**Originality.** Statistical descriptions of the spindle trajectories and their influence on the formation of the spindle block accuracy indicators depending on the operational parameters of hydrostatic supports and technological loads were established.

УДК 621.924.1

**А.Ф. Саленко<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, проф.,  
**А.Н. Федотьев<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, доц.,  
**Л.П. Федотьева<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, доц.,  
**А.М. Мана<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, доц.

**Practical value.** The proposed methodology of the research on the accuracy of the spindle movement trajectories based on the modern precision information-measuring complex can be used to analyze the accuracy of a wide range of rotating units of technological equipment.

**Keywords:** *spindle, accuracy, trajectory, laser sensor, hydrostatic bearing*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.В. Кальченком. Дата надходження рукопису 30.10.14.*

1 – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг, Украина

2 – ООО Производственно-внедренческое, конструкторско-технологическое и научно-исследовательское предприятие „Инструмент“, г. Светловодск, Украина, e-mail: fan450@yandex.ru

## МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ БУРОВЫХ ДОЛОТ

**A.F. Salenko<sup>1</sup>**, Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
**A.N. Fedotiev<sup>2</sup>**, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Professor,  
**L.P. Fedotieva<sup>1</sup>**, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Professor,  
**O.M. Mana<sup>1</sup>**, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Professor

1 – Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine

2 – “Instrument” Ltd., Svetlovodsk, Ukraine, e-mail: fan450@yandex.ru

## METHODS OF PRODUCTION AND PROCESSING OF WEAR-RESISTANT COATINGS FOR DRILL BITS

**Цель.** Для бурения газовых и нефтяных скважин применяют долота, оснащенные поликристаллическими алмазными резаками (PDC). Резервом в снижении себестоимости изготовления наплавленных износостойких покрытий является использование отходов как вольфрамовых твердых сплавов, так и безвольфрамовых. Однако процессы лезвийной обработки таких покрытий не исследовались. Совершенствование существующих и создание новых методов обработки этих поверхностей является актуальной задачей научных исследований современности и целью данной работы.

**Методика.** Проведение сравнительных испытаний различных инструментальных материалов при точении покрытий из твердого сплава. Формирование рекомендаций по выбору рациональных режимов обработки при пирамидальном точении покрытий из твердого сплава материалом марки СВБН. Определение стойкости исследуемого инструмента при точении резаками покрытий из твердого сплава группы ВК и ТН.

**Результаты.** Проведенные экспериментальные исследования показали, что из исследуемых режущих материалов „Эльбор-Р“, „Карбонадо“, СВБН-1 и СВБН-5В лучшие результаты по производительности обработки получены при использовании СВБН-5В. Силы резания, возникающие при точении, могут являться критерием для определения рациональных режимов резания, исходя из максимального съема обрабатываемого твердого сплава. С повышением содержания связки от 8 до 20% обрабатываемость покрытий из твердых сплавов точением снижается в 2–3 раза; шероховатость поверхности при обработке покрытий из твердых сплавов ВК8, ТН20 – Ra = 2–2,5 мкм; ВК15С, ВК20КС – Ra = 0,5 мкм; рациональные режимы при точении покрытий из твердых сплавов ВК8 – ВК20 материалом СВБН-5В, V = 18–20 м/мин, S = 0,11–0,13 мм/об, t = 0,7–0,9 мм.

**Научная новизна.** Установлены эмпирические зависимости и разработаны математические модели производительности обработки точением покрытий из твердых сплавов и сил резания, возникающих при этом.

**Практическая значимость.** Разработанные математические модели могут использоваться при определении оптимальных режимов точения покрытий из твердых сплавов, применяемых для повышения износостойкости изделий, работающих в условиях абразивного и умеренного ударного воздействия, например, корпусов буровых долот.

**Ключевые слова:** *буровое долото, регенерация отходов твердого сплава, износостойкое покрытие, точение износостойких покрытий*