

Міністерство освіти і науки України  
Чернігівський національний технологічний університет

**САПОН СЕРГІЙ ПЕТРОВИЧ**



УДК 621.941-229.3:621.822.172

**ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ НА  
РЕГУЛЬОВАНИХ ГІДРОСТАТИЧНИХ ОПОРАХ**

05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата  
технічних наук

Чернігів - 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі технологій машинобудування та деревообробки Чернігівського національного технологічного університету Міністерства освіти і науки України, м. Чернігів.

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент  
**Федориненко Дмитро Юрійович**  
Чернігівський національний технологічний університет,  
м. Чернігів,  
професор кафедри технологій машинобудування та  
деревообробки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Струтинський Василь Борисович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», м. Київ,  
завідувач кафедри конструювання верстатів та машин

кандидат технічних наук, доцент  
**Волошин Віталій Несторович**,  
Технічний коледж Тернопільського національного  
технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль,  
заступник директора з навчальної роботи

Захист відбудеться “26” червня 2014 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 79.051.02 у Чернігівському національному технологічному університеті за адресою 14027, Чернігів, вул. Шевченка, 95, корпус №2, ауд. № 306.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Чернігівського національного технологічного університету за адресою 14027, Чернігів, вул. Шевченка, 95.

Автореферат розісланий “22” травня 2014 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



А.М.Єрошенко



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасні пріоритети розвитку машинобудівної галузі висувають підвищені вимоги до точності обробки, продуктивності, надійності металообробного обладнання та рівня його автоматизації. Одним з найбільш відповідальних формоутворюючих вузлів будь-якого верстата є шпиндельний вузол (ШВ), вихідні показники точності якого в значній мірі залежать від типу шпиндельних опор. Розробка нових та модернізація існуючих конструкцій ШВ шляхом застосування в них гідростатичних опор (ГСО) регульованого типу є ефективним напрямком підвищення точності верстатів, що забезпечить розширення їх технологічних можливостей шляхом суміщення чорнової та чистової обробки, підвищення продуктивності обробки на основі високошвидкісних конструктивних виконань опор та зниження експлуатаційних витрат завдяки регулюванню геометричних, експлуатаційних параметрів ГСО залежно від характеру технологічного навантаження.

Відомі дослідження точності ШВ з ГСО переважно ґрунтуються на оцінці детермінованого впливу окремих конструктивних, експлуатаційних, геометричних параметрів ГСО, технологічних навантажень, пружних та температурних деформацій на вихідні показники точності ШВ. Опорні поверхні ГСО переважно ідеалізуються або враховуються їх окремі геометричні відхилення. Такі підходи не дозволяють адекватно, в умовах максимально наближених до реальних умов експлуатації визначити вихідні показники точності ШВ. Це зумовлено тим, що реальні поверхні шпиндельних ГСО містять сукупність відхилень форми та змінюються під дією пружних і температурних деформацій, які, як і більшість експлуатаційних параметрів ГСО та технологічних навантажень, мають випадковий характер та здійснюють одночасний вплив на ШВ.

Тому дослідження, спрямовані на підвищення точності ШВ шляхом розробки нових конструкцій опорних вузлів та виявлення закономірностей формування показників точності ШВ з одночасним урахуванням похибок форми, пружних та температурних деформацій опорних поверхонь, випадкового характеру експлуатаційних параметрів шпиндельних ГСО та технологічних навантажень є актуальною науковою задачею, вирішення якої дозволить підвищити якість верстатів та розширити їх технологічні можливості.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до наукової тематики кафедри технологій машинобудування та деревообробки Чернігівського національного технологічного університету (ЧНТУ). Здобувач брав безпосередню участь у виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт: № 71/09 „Теоретичні основи створення гідравлічних опор високошвидкісних шпиндельних вузлів з системою керування товщиною рідинної плівки” (№ ДР 0109U000001) та № 76/11 „Теоретичні основи забезпечення точності шпиндельних вузлів на керованих гідростатичних опорах” (№ ДР 0111U000244).

### **Мета і задачі дослідження.**

Метою роботи є підвищення точності обертання шпинделя на основі розробки нових конструкцій шпиндельних гідростатичних опор регульованого типу та встановлення їх раціональних конструктивних та експлуатаційних параметрів.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язувалися наступні **задачі**:

- аналіз методів і засобів підвищення точності ШВ з ГСО;
- розробка математичної моделі, що враховує вплив конструктивних параметрів, похибок форми, температурних деформацій опорних поверхонь підшипника, випадковий характер експлуатаційних параметрів ГСО та технологічних навантажень на точність траєкторії руху шпинделя на ГСО;
- встановлення закономірностей формування геометричної точності верстата за показником точності траєкторій переміщення шпинделя на ГСО залежно від технологічних навантажень, експлуатаційних параметрів ГСО, похибок форми та температурних деформацій опорних поверхонь ГСО;
- експериментальні дослідження закономірностей формування точності верстата за показником точності форми зразків-виробів залежно від експлуатаційних параметрів шпиндельних ГСО та технологічних навантажень;
- встановлення взаємозв'язку статистичних характеристик траєкторій руху шпинделя та контурів оброблених поверхонь зразків-виробів;
- розробка методики та практичних рекомендацій з використання раціональних експлуатаційних та конструктивних параметрів ГСО регульованого типу на прецизійних верстатах токарної групи;
- розробка спеціальних конструкцій регульованих гідростатичних опор, які забезпечують підвищення точності та швидкохідності шпиндельних вузлів;
- розробка технологічних засобів підвищення точності регульованих гідростатичних підшипників з пружними елементами корпусу.

**Об'єкт дослідження** – процес формування точності шпиндельного вузла з ГСО під дією змінного навантаження в технологічній системі.

**Предмет дослідження** – показники точності шпиндельного вузла з ГСО регульованого типу.

**Методи дослідження.** Основні методи, що використані в роботі: методи теорії ймовірностей, диференційного числення, спектрального аналізу для дослідження показників точності ШВ; фундаментальні положення гідродинамічної теорії мащення, метод планування експерименту, статистичні методи, методи гармонічного та спектрального аналізу застосовувалися для аналізу впливу експлуатаційних параметрів ГСО та технологічних навантажень на показники точності ШВ; експериментальні методи досліджень, на основі яких встановлювалася адекватність розроблених математичних моделей; метод морфологічного аналізу для пошуку нових технічних рішень при розробці нових конструкцій шпиндельних ГСО регульованого типу.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

– набув подальшого розвитку програмний метод дослідження металорізальних верстатів в частині оцінки точності шпиндельних вузлів шляхом встановлення взаємозв'язку статистичних характеристик траєкторій руху шпинделя та геометричних відхилень форми оброблених поверхонь зразків-виробів;

– вперше розроблена математична модель траєкторій руху шпинделя на ГСО, що дозволяє підвищити точність визначення положення шпинделя шляхом одночасного врахування впливу конструктивних параметрів, геометричних відхилень форми, температурних деформацій спряжених поверхонь підшипника, випадкових і детермінованих технологічних навантажень та експлуатаційних параметрів ГСО;

– встановлено закономірності формування геометричної точності токарного верстата з регульованими ГСО шпинделя за показниками точності траєкторій переміщення шпинделя та точністю геометричної форми зразків-виробів залежно від тиску, температури мастила в карманах ГСО шпинделя, режимів різання, статичного дисбалансу обертових елементів ШВ;

– отримала подальшого розвитку залежність для опису функції радіального зазору в ГСО, в якій одночасно з похибками форми враховано температурні зміщення опорних поверхонь підшипника.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

– з метою підвищення показників точності обробки на токарних верстатах розроблено алгоритм, методику та програмне забезпечення для вибору раціональних експлуатаційних та конструктивних параметрів регульованих ГСО шпинделя, які можуть бути використані при проектуванні широкої номенклатури технологічних машин з опорними гідростатичними вузлами;

– запропоновано практичні рекомендації з вибору раціональних режимів різання та експлуатаційних параметрів шпиндельних ГСО при чистовій токарній обробці конструктивно неврівноважених заготовок;

– розроблені новітні схемні рішення конструкцій регульованих ГСО, що дозволяють підвищити точність та швидкохідність ШВ шляхом забезпечення стабільної величини товщини мастильного шару між спряженими опорними поверхнями та зниження втрат потужності на в'язке тертя і нагнітання рідини;

– запропоновано технологічні засоби підвищення точності виконавчих поверхонь регульованих ГСО, які забезпечують зниження впливу технологічної спадковості на величину радіального зазору між спряженими поверхнями підшипника.

Результати наукових досліджень у вигляді нових конструкцій, методик проектного розрахунку регульованих ГСО впроваджено у виробництво на ТОВ «Екоспецпостач», ТОВ „Український кардан” (м. Чернігів) та навчальний процес Чернігівського національного технологічного університету.

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні положення та наукові результати, які виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем самостійно. Постановка мети, задач дослідження, відпрацювання структури роботи виконані разом з науковим керівником. Конструкції ГСО розроблені та деякі результати експериментальних досліджень отримані спільно з науковим керівником та співавторами публікацій.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися та обговорювалися на наступних науково-технічних конференціях: „Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем” (м. Чернігів, 2011 р., 2012 р., 2013р.); «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Донецьк, 2011 р., м. Чернігів, 2012 р., м. Одеса, 2013 р.); „Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів” (м. Луцьк, 2012 р.), „Гідроаеромеханіка в інженерній практиці” (м. Черкаси, 2012 р., м. Київ, 2013 р.); „Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Севастополь, 2013 р.).

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалась на XIV Міжнародній науково-технічній конференції АС ПГП “Промислова гідравліка і пневматика” (м. Одеса, 2013 р.), IV Міжнародній науково-технічній конференції „Комплексне

забезпечення якості технологічних процесів та систем” (м. Чернігів, 2014 р.) та розширеному науковому семінарі кафедри технологій машинобудування та деревообробки ЧНТУ (м. Чернігів, 2014 р.).

**Публікації.** Результати досліджень опубліковані в 21 науковій праці, в тому числі у 11 статтях у фахових виданнях, з них 3 статті опубліковані у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз даних, 8 матеріалах та тезах доповідей міжнародних конференцій, отримано 2 патенти України на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів основної частини, висновків, додатків, списку використаних джерел (176 найменувань). Загальний обсяг роботи становить 257 сторінок, у тому числі 190 сторінок основного тексту, 50 сторінок додатків, 17 сторінок списку використаних джерел, 22 повні сторінки з рисунками та таблицями (14 сторінок з рисунками, 8 сторінок з таблицями).

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику, обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів дослідження, наведено інформацію щодо апробації результатів дисертації та публікацій.

У **першому розділі** здійснено огляд літератури, присвяченої теоретичним і експериментальним дослідженням показників точності ШВ з ГСО. Значну увагу питанням підвищення точності шпindelних вузлів металорізальних верстатів приділено в роботах Б.С. Балакшина, В.Н. Волошина, Ю.М. Данильченка, І.А. Зверева, В.В. Камінської, О.В.Косминіна, В.О. Кудінова, Ю.М. Кузнецова, В.Т. Портмана, О.С. Пронікова, В.Е. Пуша, О.В. Пуша, Д.М. Решетова, В.В. Селезньової, В.Б. Струтинського, О.М.Фігатнера, В.В.Юркевича, К.Mitsui, в яких висвітлено загальні підходи до оцінки точності ШВ. Дослідженню точності ШВ з ГСО присвячені роботи Н.П. Артеменка, В.В. Бушуєва, О.Ф. Гордєєва, В.Д. Ковальова, О.В. Пуша, Ю.О. Сахна, Ю.М.Соколова, В.Б. Струтинського, Д.Ю. Федориненка, С.М. Шатохіна та інших вчених.

Аналіз існуючих методів оцінки точності ШВ показав, що об'єктивно визначити вихідні показники точності можна лише врахувавши максимальну кількість факторів, які одночасно діють на ШВ, здійснивши оцінку точності обертання шпинделя за інтегральними показниками: параметри траєкторій руху опорних точок на допоміжних базах шпинделя або параметри просторового положення характеристичного вектора шпинделя. Постійне зростання вимог до точності обробки вимагає подальшого удосконалення існуючих методик оцінки точності ШВ в частині застосування сучасних високоточних засобів вимірювання, вільно доступних програмних пакетів та інформаційних технологій з метою встановлення закономірностей формування точності ШВ під впливом експлуатаційних факторів, які в найбільшій мірі проявляються в процесі обробки.

Аналіз проблематики застосування ГСО у ШВ верстатів показав, що перспективним напрямком підвищення точності ШВ є розробка нових та модернізація існуючих конструкцій ШВ шляхом застосування в них ГСО з регульованими в процесі обробки конструктивними та експлуатаційними параметрами. Це дозволить розширити

технологічні можливості верстатів шляхом суміщення чорнової та чистої обробки, підвищити продуктивність обробки та знизити експлуатаційні витрати завдяки керуванню параметрами ГСО залежно від характеру технологічного навантаження. Відмічено, що технічна реалізація способу регулювання конструктивних параметрів, наприклад зазору в ГСО, вимагає зміни конструкції шпindelної опори. Без внесення змін в конструкцію ШВ одним із способів підвищення його точності є застосування ГСО з регульованими витратними характеристиками.

Проведений аналіз конструкцій шпindelних регульованих ГСО показав, що існуючі конструктивні рішення потребують подальшого удосконалення в напрямку підвищення точності виконавчих поверхонь, технологічності виготовлення, точності регулювання конструктивних параметрів, ремонтоздатності та розширення номенклатури конструкційних матеріалів для виготовлення елементів опор.

В результаті аналізу теоретичних підходів до визначення точності ШВ з ГСО показано, що існуючі математичні моделі шпindelних підшипників потребують уточнення в частині врахування одночасно з геометричними відхиленнями форми опорних поверхонь їх температурних деформацій, а також випадкових і детермінованих складових технологічних навантажень та експлуатаційних параметрів ГСО.

На основі здійсненого аналізу існуючих методів та засобів підвищення точності шпindelних вузлів з ГСО була сформульована мета і задачі дослідження та встановлено шляхи, методи і засоби досягнення поставленої мети (рисунок 1).

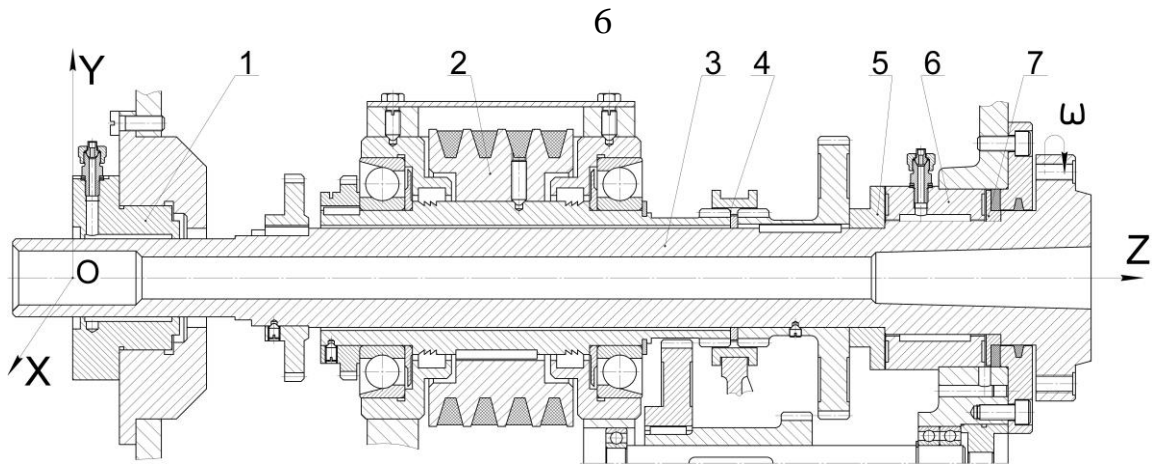


Рисунок 1 – Мета дослідження, шляхи, методи і засоби її досягнення

У другому розділі розроблено математичну модель траєкторій руху шпindelа в зосереджених параметрах, що дозволяє визначити положення шпindelа на основі врахування одночасного впливу конструктивних параметрів, геометричних відхилень форми, температурних деформацій опорних поверхонь підшипника, випадкового характеру експлуатаційних параметрів ГСО та технологічних навантажень.

В якості об'єкту моделювання розглянуто ШВ прецизійного токарного верстата УТ16А (рисунок 2), шпindel 3 якого встановлений на двох радіальних чотирьохкарманних ГСО 1 і 6 та упорному підшипнику, утвореному торцями втулок 5 та 7 і корпусом передньої радіальної ГСО.





1, 6 – радіальні ГСО, 2 – шків приводу, 3 – шпиндель, 4 – зубчаста муфта, 5, 7 – втулки осьової ГСО

Рисунок 2 – Конструктивна схема ШВ токарного верстата УТ16А

Положення шпинделя у просторі під дією силового навантаження та реакцій у ГСО описується траєкторію руху його осі. Враховуючи, що осьові зміщення шпинделя токарного верстата фактично не впливають на точність формоутворення в радіальному напрямку, дослідження точності ШВ здійснено за показниками траєкторій його руху в площині, перпендикулярній до геометричної осі.

Зміщення шпинделя під дією силових навантажень та реакцій мастильного шару представлено у вигляді еквівалентної одномасової динамічної моделі, що включає в себе приведену масу  $m$ , яка зміщується у вертикальному та горизонтальному напрямках під дією приведених до зони різання проєкцій рівнодіючої силових навантажень та рівнодіючої реакцій в ГСО. Внаслідок незначного впливу характеристик задньої ГСО шпинделя на показники точності обробки реакції мастильного шару, що виникають в задній ГСО, не враховували.

Враховуючи застосування у приводі головного руху верстата УТ16А розвантаженої від зусиль натягу пасів пасової передачі, зусилля з боку приводу представлено випадковою складовою, зумовленою ударними процесами взаємодії зубчастих коліс у зубчастій муфті 4 (див. рисунок 2).

З врахуванням всіх попередньо здійснених припущень система диференціальних рівнянь, які описують зміщення шпинделя в площині, перпендикулярній його геометричній осі, матиме вигляд:

$$\begin{cases} m \frac{d^2x}{d\tau^2} = \chi_c F_{Cx}(\tau) - \chi_F R_x + \chi_R F_{prx}(\tau) + \chi_P P_x(\tau), \\ m \frac{d^2y}{d\tau^2} = \chi_c F_{Cy}(\tau) - \chi_F R_y + \chi_R F_{pry}(\tau) + \chi_P P_y(\tau) + \chi_G mg, \end{cases} \quad (1)$$

де тут і далі,  $\chi_c$ ,  $\chi_R$ ,  $\chi_P$ ,  $\chi_G$  – коефіцієнти приведення сил та маси до зони різання;  $F_{Cx}$ ,  $F_{Cy}$ ,  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $F_{pry}$ ,  $F_{prx}$  – проєкції на осі ОХ та ОУ відповідно відцентрової сили інерції, складових зусилля різання та зусилля з боку приводу головного руху, Н;  $R_x$ ,  $R_y$  – проєкції рівнодіючої реакцій у ГСО, Н.

Зусилля, що виникає внаслідок ударних навантажень в зубчастій передачі приводу головного руху шпинделя, представлено у вигляді «білого шуму», модель якого сформована у вигляді випадкової послідовності дельта-імпульсів  $\delta(\tau_i)$  з випадковими амплітудними значеннями  $a(\tau)$ :

$$F_{\text{рх}}^c(\tau) = a(\tau) \sin \alpha \cdot \delta(\tau - \tau_i), \quad F_{\text{рy}}^c(\tau) = a(\tau) \cos \alpha \cdot \delta(\tau - \tau_i), \quad (2)$$

де  $\alpha$  – кут прикладання ударного імпульсу,  $(^0)$ ,  $\tau_i$  – випадковий момент часу виникнення збурення, с,  $\delta(\tau - \tau_i) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \tau = \tau_i \\ 0, & \text{якщо } \tau \neq \tau_i \end{cases}$

Для описання випадкових величин, що входять до складових правої частини рівнянь (1) у загальному випадку застосовували залежність:

$$f(\tau) = \bar{m}_f + \Delta f \cdot \xi(\tau), \quad (3)$$

де  $\bar{m}_f$ ,  $\Delta f$  – математичне сподівання та діапазон відхилення величини від свого середнього значення;  $\xi(\tau)$  – центрований випадковий процес коливання величини.

Враховавши випадкові складові глибини різання, подачі, частоти обертання шпинделя, абсолютні значення проєкцій  $P_x$ ,  $P_y$  зусилля різання в певний момент часу  $\tau$  визначали за залежностями:

$$P_x(\tau) = 10C_{P_x}(t_n + \Delta \cdot \cos(\omega_n \tau + \varepsilon) + \Delta t_n \cdot \xi(\tau))^x (S_0 + \Delta S_0 \cdot \eta(\tau))^y \times \\ \times \left( \frac{3D \cdot (\omega_n + \Delta \omega_n q(\tau))}{100} \right)^n \cdot K_{P_x}(\tau), \quad (4)$$

$$P_y(\tau) = 10C_{P_y}(t_n + \Delta \cdot \sin(\omega_n \tau + \varepsilon) + \Delta t_n \cdot \xi(\tau))^x (S_0 + \Delta S_0 \cdot \eta(\tau))^y \times \\ \times \left( \frac{3D \cdot (\omega_n + \Delta \omega_n q(\tau))}{100} \right)^n \cdot K_{P_y}(\tau), \quad (5)$$

де тут і далі,  $C_{P_x}$ ,  $C_{P_y}$ ,  $n$ ,  $x$ ,  $y$  – коефіцієнти та показники степені, що враховують вид обробки, фізико-механічні властивості матеріалу інструменту і заготовки,  $t_n$  – номінальне значення глибини різання, мм;  $\Delta t_n$  – величина коливання припуску, мм;  $\Delta$  – зміщення шпинделя за наявності статичної невірноваженості, мм;  $S_0$ ,  $\Delta S_0$  – номінальне значення та діапазон відхилення подачі на оберт, мм/об;  $D$  – діаметр оброблюваної поверхні, мм;  $\omega_n$ ,  $\Delta \omega_n$  – номінальне значення та діапазон відхилення кутової швидкості обертання,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\varepsilon$  – початкова фаза статичного дисбалансу, рад;  $K_{P_x}(\tau)$ ,  $K_{P_y}(\tau)$  – поправочні коефіцієнти, що враховують фактичні умови обробки;  $\xi(\tau)$ ,  $q(\tau)$ ,  $\eta(\tau)$  – випадкові процеси коливання глибини різання, кутової швидкості та подачі на оберт відповідно.

Поправочні коефіцієнти  $K_{P_x}$ ,  $K_{P_y}$ , що враховують фактичні умови обробки представлено як добуток миттєвих значень ряду коефіцієнтів, представлених у вигляді випадкових величин з відповідними діапазонами зміни та законами розподілу:

$$K_{P_x}(\tau) = K_{\text{мр}}(\tau) \cdot K_{\varphi P_x}(\tau) \cdot K_{\gamma P_x}(\tau) \cdot K_{\lambda P_x}(\tau) \cdot K_{r P_x}(\tau), \quad (6)$$

$$K_{P_y}(\tau) = K_{\text{мр}}(\tau) \cdot K_{\varphi P_y}(\tau) \cdot K_{\gamma P_y}(\tau) \cdot K_{\lambda P_y}(\tau) \cdot K_{r P_y}(\tau), \quad (7)$$

де  $K_{\text{мр}}(\tau)$  – поправочний коефіцієнт, що враховує фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу;  $K_{\varphi P_x}(\tau)$ ,  $K_{\gamma P_x}(\tau)$ ,  $K_{\lambda P_x}(\tau)$ ,  $K_{r P_x}(\tau)$ ,  $K_{\varphi P_y}(\tau)$ ,  $K_{\gamma P_y}(\tau)$ ,  $K_{\lambda P_y}(\tau)$ ,  $K_{r P_y}(\tau)$  – поправочні коефіцієнти, що враховують вплив геометричних параметрів різальної частини інструмента.

Проекції відцентрової сили інерції, зумовленої статичною невірноваженістю обертових елементів шпindelного вузла, з врахуванням коливання величини кутової швидкості визначали за залежностями:

$$F_{Cx}(\tau) = m\Delta(\omega_n + \Delta\omega_n \cdot q(\tau))^2 \cos(\omega_n \tau + \varepsilon), \quad (8)$$

$$F_{Cy}(\tau) = m\Delta(\omega_n + \Delta\omega_n \cdot q(\tau))^2 \sin(\omega_n \tau + \varepsilon) \quad (9)$$

Нехтуючи внаслідок малості складовою реакцій, обумовленою силами тертя в мастильному шарі, проекції рівнодіючої реакцій мастильного шару в передній ГСО шпинделя в функції полярного кута  $\varphi$  представлено складовою реакції, що обумовлена гідростатичним тиском мастила на опорну шийку шпинделя:

$$R_x = \frac{D_0}{2} \int_0^{2\pi} p(\varphi) \cos \varphi d\varphi, \quad R_y = \frac{D_0}{2} \int_0^{2\pi} p(\varphi) \sin \varphi d\varphi, \quad (10)$$

де  $D_0$  – діаметр опорної частини ГСО, мм;  $p(\varphi)$  – функція розподілу тиску на опорній частині ГСО, МПа.

Функція розподілу тиску  $p(\varphi)$  на опорній частині регульованої ГСО визначається шляхом подвійного інтегрування рівняння Рейнольдса та безпосередньо залежить від радіального динамічного зазору  $h(\varphi)$ , який при одночасному врахуванні похибок форми та зміщень опорних поверхонь, зумовлених їх пружними та температурними деформаціями, описано залежністю:

$$h(\varphi) = \delta_0 - m(\Delta r_T^{BT}) - m(\Delta r_T^{III}) + \frac{T_{кр}^{BT}}{2} + \frac{T_{кр}^{III}}{2} + \sum_{k=1}^N A_k^{BT} \sin(k\varphi + \psi_{0k}^{BT}) - \sum_{k=1}^Q A_k^{III} \sin(k\varphi + \chi_{0k}^{III}), \quad (11)$$

де  $m(\Delta r_T^{BT})$ ,  $m(\Delta r_T^{III})$  – математичні сподівання величини зміщення радіальної координати профілю опорних поверхонь гідростатичної втулки та шпинделя відповідно, обумовлені температурними деформаціями при певній усталеній температурі, мкм;  $\delta_0$  – радіальний статичний зазор в опорі, мкм;  $T_{кр}^{BT}$ ,  $T_{кр}^{III}$  – допуски круглості опорних поверхонь підшипника, мкм;  $A_k^{BT}$ ,  $\psi_{0k}^{BT}$ ,  $A_k^{III}$ ,  $\chi_{0k}^{III}$  – амплітуди та початкові фази гармонік рядів Фур'є, які описують відхилення опорних поверхонь гідростатичної втулки та шпинделя відповідно, мкм та ( $^0$ );  $N$  та  $Q$  – кількість значимих гармонік профілю опорних поверхонь гідростатичної втулки і шпинделя при певній температурі.

Математичні сподівання величини зміщення радіальної координати  $m(\Delta r_T^{BT})$ ,  $m(\Delta r_T^{III})$  профілю опорних поверхонь визначалися за результатами чисельного моделювання засобами САЕ-системи SolidWorks Simulation (рисунок 3). Кількість  $N$ ,  $Q$  та амплітуди  $A_k^{BT}$ ,  $A_k^{III}$  гармонік профілю опорних поверхонь ГСО визначали, здійснивши спектральний аналіз їх контуру, побудованого за результатами чисельного моделювання зміщень радіальної координати профілю опорних поверхонь внаслідок дії температурних (рисунок 4) та пружних деформацій засобами САЕ-системи SolidWorks Simulation.

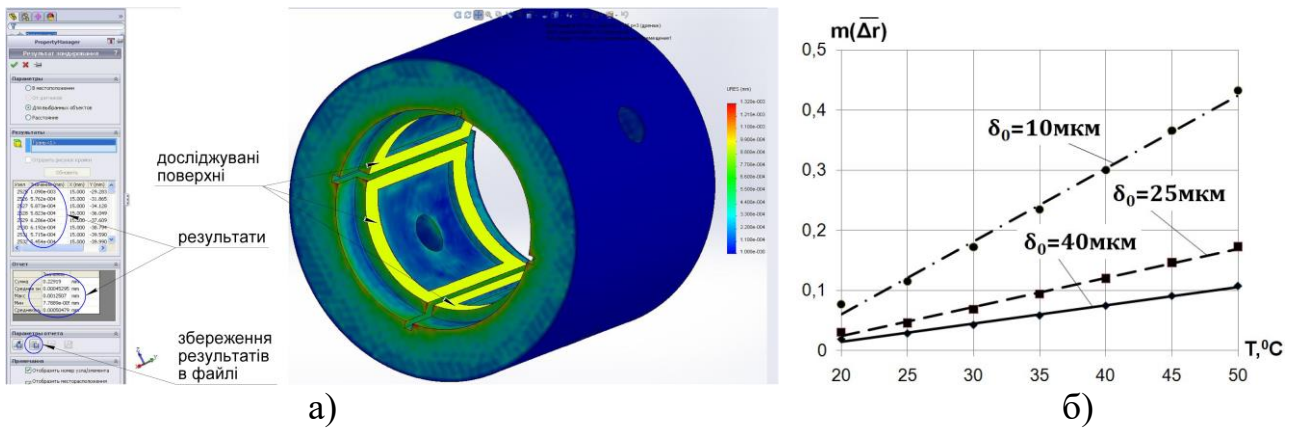


Рисунок 3 – Відображення результатів моделювання температурних зміщень гідростатичної втулки а) та залежність математичного сподівання  $m(\overline{\Delta r})$  питомої величини зміщення радіальної координати профілю опорних поверхонь ГСО від температури б) при різних величинах радіального статичного зазору  $\delta_0$

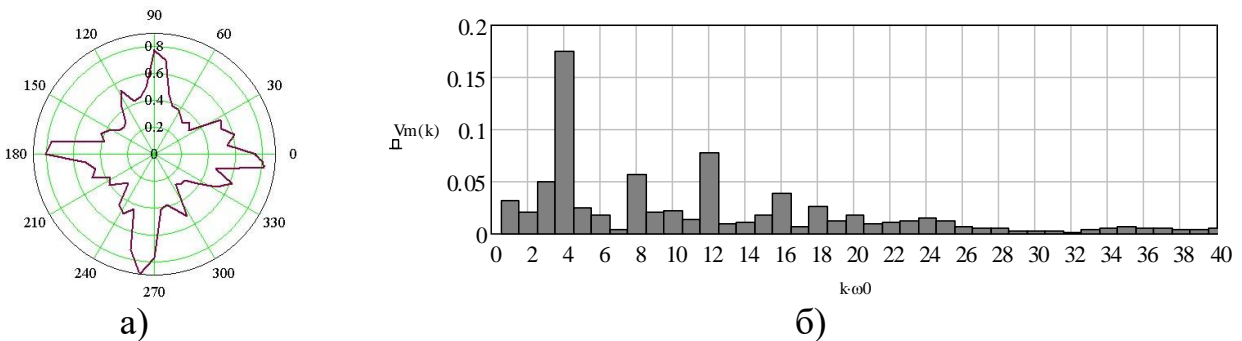


Рисунок 4 – Температурні зміщення ( $T=35^\circ\text{C}$ ) профілю опорної поверхні гідростатичної втулки апроксимованого в пакеті MathCAD кубічними сплайнами а) та типовий спектр б) амплітуд гармонік профілю

У загальному випадку, враховуючи нелінійність та випадковий характер складових, що входять до правих частин рівнянь, система (1) не має аналітичного розв'язку. Для чисельного моделювання траєкторій руху шпинделя застосовано статистичне моделювання методом Монте-Карло.

Описання переміщень шпинделя здійснювали радіус-вектором  $R(\varphi_j) = \sqrt{x^2(\tau_j) + y^2(\tau_j)}$  в полярній системі координат. Встановлено, що робочий процес коливань шпинделя на ГСО є стаціонарним та ергодичним процесом, який має яскраво виражений стохастичний характер у всіх діапазонах варіювання експлуатаційних параметрів та технологічних навантажень. Причому закон розподілу випадкової величини коливань шпинделя наближений до нормального. Тому оцінювання параметрів траєкторій шпинделя здійснювали за статистичними характеристиками радіус-вектора: математичним сподіванням  $m_R$  та середньоквадратичним відхиленням (СКВ)  $\sigma_R$ , які визначають відповідно зміщення та розсіювання положень шпинделя і впливають на точність номінального розміру оброблюваної поверхні.

За результатами чисельного моделювання встановлено, що збільшення тиску в карманах ГСО з 1 МПа до 3 МПа сприяє підвищенню точності обробки, що проявлялося у зменшенні математичного сподівання  $m_R$  радіус-вектора траєкторій шпинделя з ідеалізованою формою опорних поверхонь – на 30%, з похибками форми опорних поверхонь – на 20%. Математичне сподівання величини радіус-вектора

траєкторій шпинделя з ідеальною формою опорних поверхонь в 1,2 – 1,4 рази менше порівняно зі шпинделем, ГСО якого мають геометричні відхилення опорних поверхонь (рисунок 5, б). На СКВ радіус-вектора траєкторій відхилення форми опорних поверхонь шпиндельних ГСО практично не впливають (рисунок 5, в).

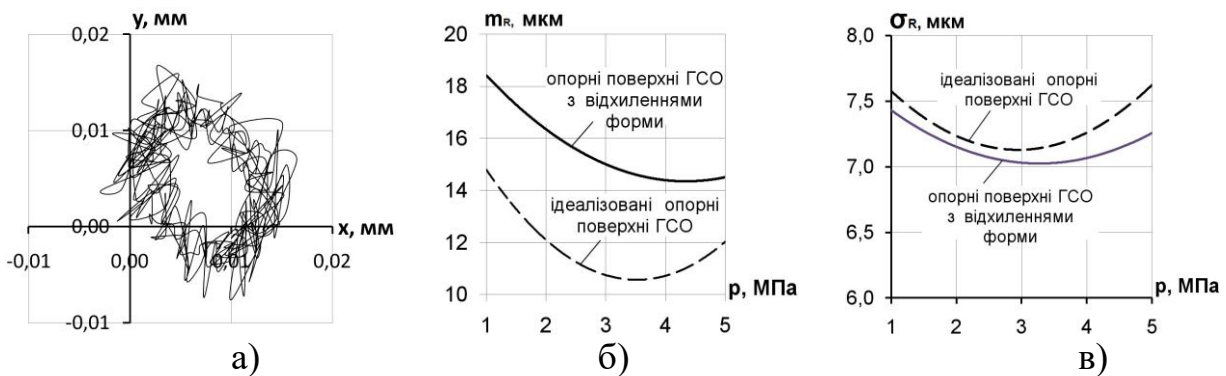


Рисунок 5 – Типові траєкторії 5 обертів шпинделя а), математичне сподівання б) та СКВ в) величини радіус-вектора траєкторій при регулюванні тиску в карманах ГСО ( $n=1500 \text{ хв}^{-1}$ ,  $D_{cm}=4360 \cdot 10^6 \text{ кг}\cdot\text{м}$ )

Типові траєкторії при варіюванні частотою обертання шпинделя при постійному тиску в карманах ГСО  $p=3 \text{ МПа}$  та статичному дисбалансі  $D_{ст}=4360 \cdot 10^6 \text{ кг}\cdot\text{м}$  приведено на рисунку 6.

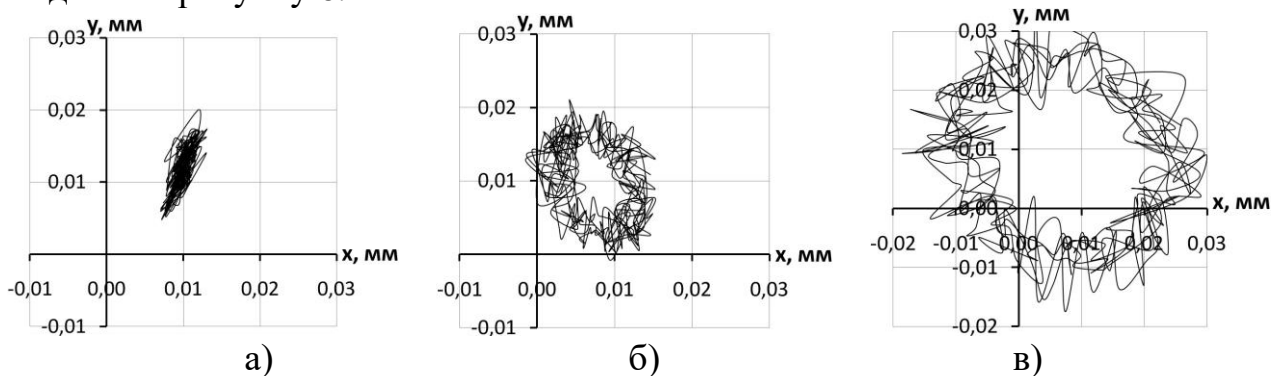


Рисунок 6 – Типові траєкторії шпинделя при варіюванні частотою обертання а)  $n=600 \text{ хв}^{-1}$ , б)  $n=1500 \text{ хв}^{-1}$ , в)  $n=2400 \text{ хв}^{-1}$  (5 обертів шпинделя)

Встановлено, що для шпинделя на ГСО з ідеалізованою формою опорних поверхонь математичне сподівання радіус-вектора  $m_R$  у діапазоні  $n=1500 - 2400 \text{ хв}^{-1}$  зростає в 1,85 рази, у той час як при врахуванні похибок форми опорних поверхонь ГСО  $m_R$  зростає в 1,4 рази (рисунок 7, а). Зі збільшенням частоти обертання різниця значень математичного сподівання  $m_R$  радіус-вектора траєкторій шпинделя для ГСО з відхиленнями форми та ідеальною формою опорних поверхонь зменшується з 40 % при  $n = 600 \text{ хв}^{-1}$  до 8 % при  $n = 2400 \text{ хв}^{-1}$ . Відхилення форми опорних поверхонь ГСО на величину СКВ радіус-вектора  $\sigma_R$  впливають при частоті обертання понад  $1500 \text{ хв}^{-1}$  (рисунок 7, б), при цьому зі зростанням частоти обертання вплив похибок форми опорних поверхонь на точність обертання шпинделя стає суттєвішим.

Тенденція до зростання статистичних характеристик точності обертання шпинделя при збільшенні частоти обертання обумовлена впливом відцентрової сили інерції, яка пропорційна квадрату кутової швидкості  $\omega$  обертання шпинделя. Деяке зменшення величини  $m_R$  у діапазоні  $n=600-1200 \text{ хв}^{-1}$  пояснюється зменшенням величини зусилля різання при зростанні швидкості різання та постійних величинах  $t_n$  та  $S_0$ .

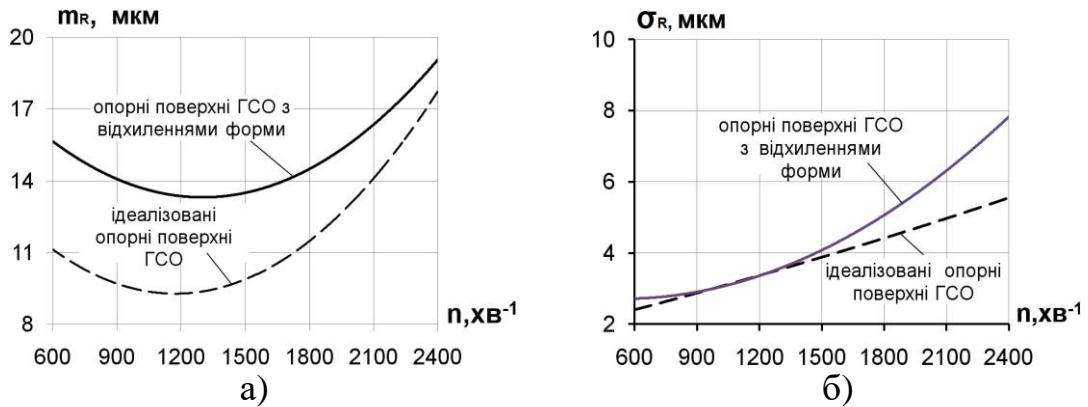
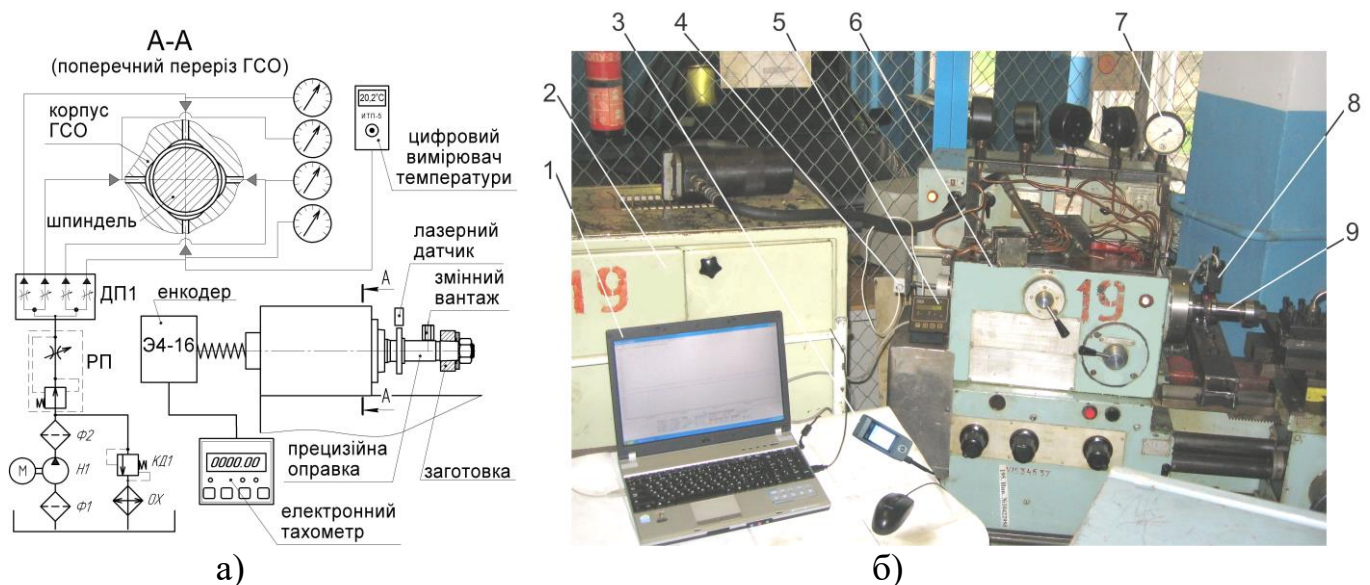


Рисунок 7 – Математичне сподівання а) та СКВ б) радіус-вектора траєкторій при варіюванні частотою обертання шпинделя

Варіювання температурою опорних поверхонь ГСО в межах від  $+25^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  суттєво не впливає на статистичні характеристики траєкторій шпинделя при постійних величинах інших експлуатаційних параметрів.

В результаті спектрального аналізу частотного складу траєкторій встановлено, що амплітуди гармонік спектрів траєкторій з відхиленням форми опорних поверхонь ГСО шпинделя на 15–60% більші аналогічних гармонік траєкторій шпинделя з ідеалізованими опорними поверхнями ГСО, що підтверджує суттєвий вплив на точність формоутворюючих рухів шпинделя точності його опорних поверхонь.

У третьому розділі наведено описання засобів та методика експериментальних досліджень точності токарного верстата з регульованими витратними характеристиками шпиндельних радіальних ГСО. Для дослідження показників точності ШВ використано комплекс засобів експериментальних досліджень, реалізований у вигляді експериментального стенда на базі прецизійного токарного верстата моделі УТ16А (рисунок 8).



1 – ноутбук, 2 – гідростанція, 3 – вимірювач температури, 4 – енодер, 5 – електронний тахометр, 6 – токарний верстат УТ16А; 7 – манометр, 8 – лазерний датчик; 9 – прецизійна оправка

Рисунок 8 – Структурна схема а) та загальний вигляд б) комплексу засобів експериментальних досліджень точності шпиндельного вузла на регульованих ГСО

Регулювання витратних характеристик радіальних ГСО шпинделя здійснювалось в режимі постійного тиску насосної установки. Експериментальні дослідження показників точності ШВ здійснювали в процесі обробки зразків-виробів (рисунок 9) з одночасною фіксацією траєкторій обертання шпинделя.

При побудові траєкторій для вимірювання радіальних зміщень шпинделя в площині ортогональній до його осі використовували два безконтактні лазерні датчики типу РФ603.2-10/2-485-U-IN-AL-CG (рисунок 10, в), робочий діапазон яких становить 2 мм, лінійність  $\pm 2$  мкм, роздільна здатність 0,2 мкм, максимальна частота дискретизації  $f_D=9,4$  кГц.

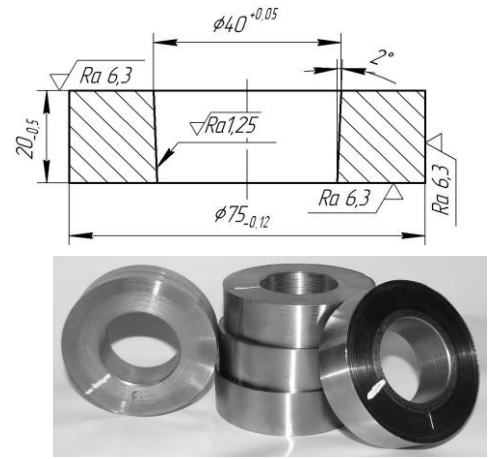
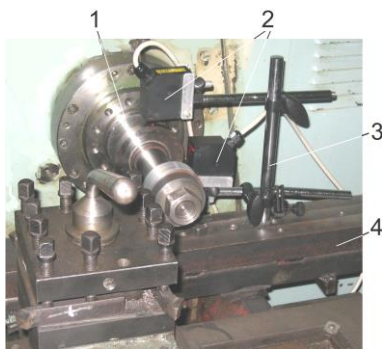
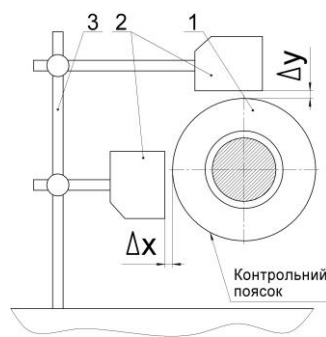


Рисунок 9 – Ескіз та загальний вигляд зразків-виробів



а)



б)



в)

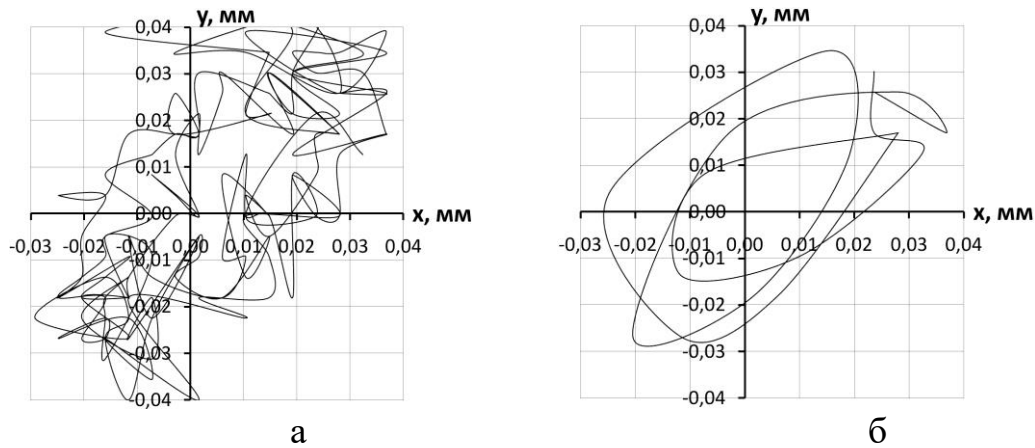
1 – прецизійна оправка; 2 – датчики; 3 – стійка; 4 – плита

Рисунок 10 – Схема закріплення та загальний вигляд лазерних датчиків

Реєстрація та відображення сигналів з лазерних датчиків реалізовувалась за допомогою цифрового осцилографа IRIS та ноутбука з програмним забезпеченням для цифрової обробки сигналів.

Для можливості ґрунтовного аналізу статистичних характеристик траєкторій шпинделя в процесі проведення експериментів частоту дискретизації сигналу на осцилографі встановлювали пропорційно частоті обертання шпинделя в межах 200 – 2500 Гц, з розрахунку забезпечення кожним датчиком 50 вимірювань за один оберт шпинделя, що відповідає мінімально припустимому обсягу вибірки  $N_{\min}=50$ , який необхідний для оцінки СКВ при рівні значимості  $\alpha=0,05$  та відносній похибці визначення СКВ  $\Delta_{\sigma} = 0,2$ . На рисунку 11 наведено траєкторії трьох обертів шпинделя побудовані за однакових умов за результатами вимірювань з частотами дискретизації 200 Гц та 2000 Гц. Як видно з рисунка 11, форма траєкторії шпинделя істотно відрізняється від еліптичної, особливо при порівняно невеликому гармонійному навантаженні, і має яскраво виражений стохастичний характер, що обумовлює доцільність застосування ймовірнісного підходу до оцінювання точності ШВ одночасно із забезпеченням високої частоти дискретизації вимірювальної апаратури.

Для кожної реалізації експерименту визначення статистичних показників траєкторій здійснювали за результатами вимірювання зміщень шпинделя шляхом формування трьох вибірок обсягом 500 дискретних значень положення шпинделя, що відповідає його 10-ти обертам. Відносна похибка визначення величини математичного сподівання радіус-вектора траєкторій  $\Delta_R$  не перевищувала 7,7 %.



а

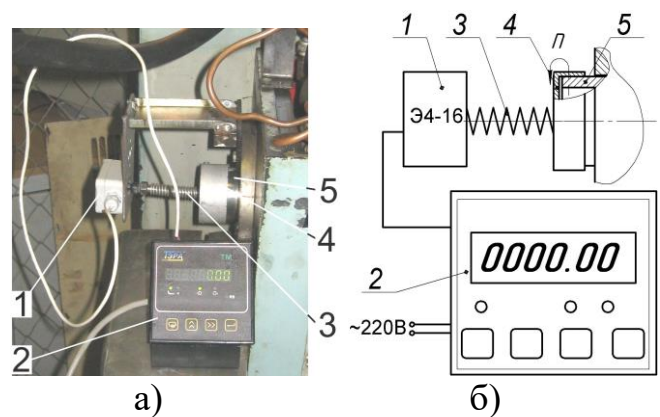
б

а –  $f_d = 2000$  Гц,      б –  $f_d = 200$  Гц,

Рисунок 11 – Траєкторії шпинделя на ГСО при наявності зовнішнього гармонічного навантаження, побудовані при різній частоті дискретизації

Частоту обертання шпинделя фіксували електронним тахометром Б-ТМ-НП1210-СК03-ИВ5ВА (рисунок 12) з точністю  $\pm 0,05$  хв<sup>-1</sup>. Вимірювання температури мастила в кармані передньої ГСО здійснювали з точністю до  $0,1^\circ\text{C}$  цифровим вимірювачем температури моделі ИТП-5-2УН-ТФТ1.

Точність обробки зразків-виробів за показником відхилення від круглості обробленої поверхні, оцінювали за допомогою вимірювального комплексу на базі кругломіра моделі 298 (рисунок 13).

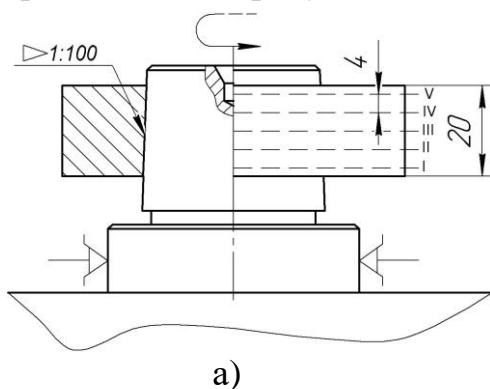


а)

б)

1 – енкодер; 2 – електронний тахометр;  
3 – пружина; 4 – стакан, 5 – шпиндель

Рисунок 12 – Загальний вигляд а) та принципова схема визначення частоти обертання шпинделя б)



а)



б)

1 – стіл кругло міра, 2 – оправка, 3 – зразок-виріб, 4 – щуп

Рисунок 13 – Схема розташування поперечних перерізів по довжині зразка-виробу а) та встановлення зразка-виробу б) на кругломірі моделі 298

Зразки-вироби 3 встановлювали на конічну оправку 2, закріплену на столі 1 кругломіра. Вимірювання відхилень від круглості зовнішньої циліндричної поверхні здійснювали в п'яти поперечних перерізах по довжині зразка-виробу. Абсолютна величина похибки вимірювання становила  $1,6$  мкм.



Встановлення закономірностей формування точності форми зразків-виробів залежно від експлуатаційних параметрів ГСО шпинделя та технологічних навантажень здійснювалось за планом багатofакторного експерименту. Для скорочення числа експериментів та розширення інтервалів варіювання факторів застосовано композиційне ортогональне планування 2-го порядку. В якості параметру оптимізації прийнято відхилення від круглості оброблених поверхонь зразків-виробів  $\Delta_{кр}$ , як один зі стандартизованих показників точності верстата, а факторами, що впливають на параметр оптимізації: режими різання (подача  $S$ , частота обертання шпинделя  $n$ , глибина різання  $t$ ), стичний дисбаланс  $D_{ст}$ , та тиск  $p$  в карманах ГСО.

Після визначення та оцінки значимості коефіцієнтів регресії, перевірки за критерієм Фішера адекватності ( $F_{розр.}=1,221 < 1,763 F_{табл}$  з довірчою ймовірністю 0,95) отримали математичну модель:

$$\Delta_{кр} = 22,56 + 2,12 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 1,51 p^2 - 3,04 \cdot t + 2,51 \cdot S - 1,175 \cdot 10^{-4} \cdot D_{ст} - 7,62 \times \\ \times p - 4,95 \cdot 10^{-3} \cdot n + 4,46 \cdot 10^{-3} D_{ст} \cdot S - 7,76 \cdot S \cdot p + 19,72 \cdot S \cdot t + 1,067 \cdot p \cdot t. \quad (12)$$

Аналіз математичної моделі показав, що зі збільшенням глибини різання в усіх випадках спостерігається зростання відхилення від круглості поверхонь зразків-виробів. Залежність відхилення від круглості від тиску в карманах опори (рисунок 14, а) та частоти обертання шпинделя (рисунок 14, б) носить екстремальний характер. Вплив подачі на відхилення від круглості зі зростанням тиску в карманах ГСО зменшується і при величині тиску 4,5–5 МПа на відхилення від круглості подача майже не впливає (рисунок 14, в). При сталій частоті обертання шпинделя та мінімальних величинах глибини різання і подачі на оберт, що відповідають чистовій обробці, збільшення статичного дисбалансу на відхилення від круглості оброблених зразків-виробів практично не впливає.

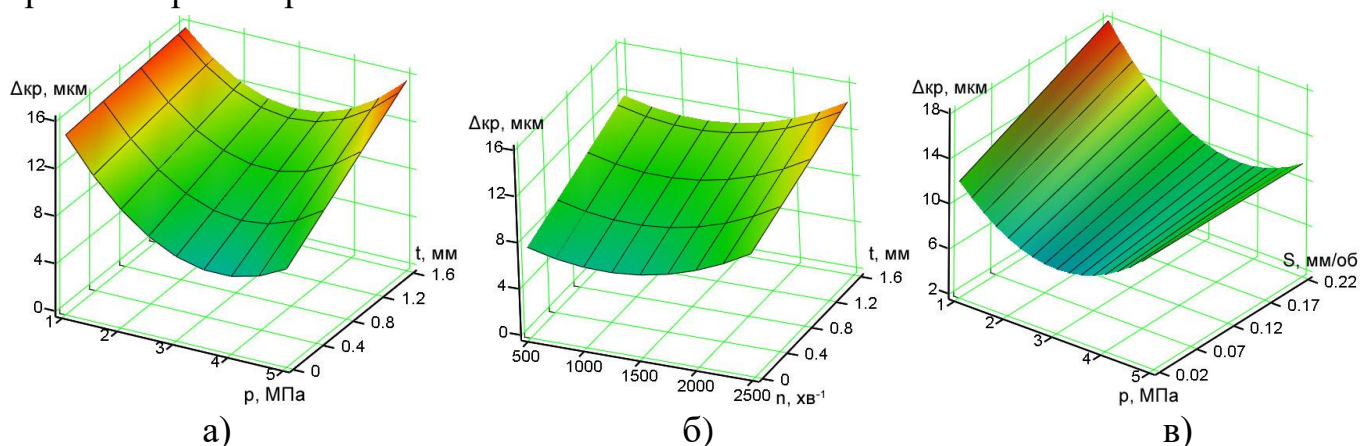


Рисунок 14 – Залежності відхилення від круглості поверхонь зразків-виробів від тиску в ГСО шпинделя та режимів різання

У четвертому розділі здійснено аналіз отриманих моделюванням і встановлених експериментальним шляхом закономірностей формування показників точності ШВ залежно від експлуатаційних параметрів ГСО та технологічних навантажень.

З метою експериментального підтвердження адекватності встановлених закономірностей впливу експлуатаційних параметрів ГСО на відхилення від круглості зразків-виробів здійснено серію повторних експериментів, результати яких

підтверджують адекватність отриманих моделюванням закономірностей формування показників точності ШВ. Зокрема підтверджено екстремальний характер залежності відхилення від круглості зразків-виробів від тиску в карманах ГСО (рисунок 15, б) та частоти обертання шпинделя (рисунок 15, в). Розбіжність між теоретичними та експериментальними даними відхилення від круглості зразків-виробів коливається в межах від 4,3 до 25,7 %.

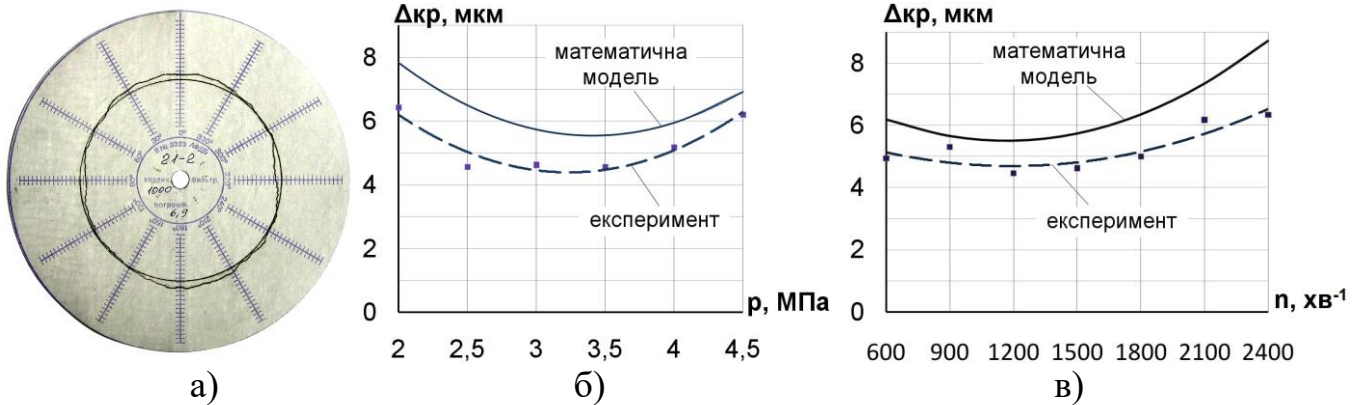


Рисунок 15 – Типова круглограма а) та залежності відхилення від круглості зразків-виробів від тиску в карманах ГСО шпинделя б) та частоти обертання в)

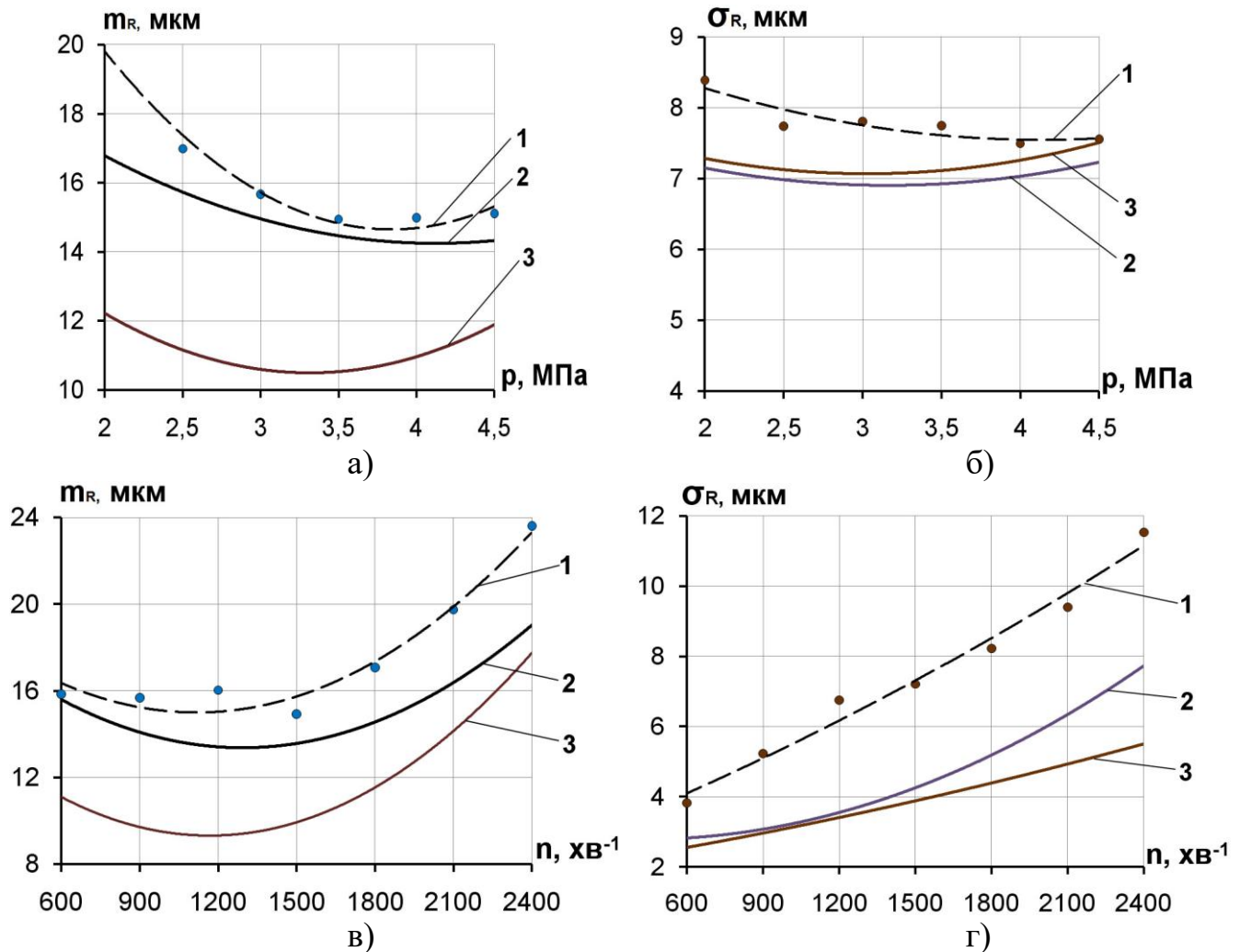
Кількісне оцінювання взаємозв'язку між отриманими залежностями здійснювали шляхом обчислення коефіцієнта парної кореляції, величина якого становила  $r_{\Delta_{кр1}, \Delta_{кр2}}^n = 0,89$  для залежностей отриманих при варіюванні частотою обертання шпинделя та  $r_{\Delta_{кр1}, \Delta_{кр2}}^p = 0,85$  – при регулюванні тиску в шпиндельних ГСО.

За результатами визначення статистичних характеристик траєкторій шпинделя встановлено, що раціональна величина тиску в карманах ГСО, при якій забезпечуються мінімальні значення математичного сподівання та СКВ радіус-вектора траєкторій, знаходиться в діапазоні 3–3,5 МПа. При підвищенні частоти обертання шпинделя в діапазоні 600–2400 хв<sup>-1</sup>, при наявності статичного дисбалансу обертючих елементів ШВ, математичне сподівання та СКВ радіус-вектора траєкторій шпинделя зростають відповідно в 1,6–2,1 та 2,5–3,4 раза.

Співставлення експериментальних та теоретичних залежностей математичного сподівання та СКВ радіус-вектора від тиску в карманах ГСО (рисунок 16, а, б) та частоти обертання шпинделя (рисунок 16, в, г) показує їх якісну узгодженість. Максимальна розбіжність між експериментальними та теоретичними значеннями математичного сподівання радіус-вектора з врахуванням відхилень форми опорних поверхонь ГСО не перевищує 16,7% при регулюванні тиску в карманах ГСО та 18,8% – при варіюванні частотою обертання шпинделя. Порівняно зі значеннями математичного сподівання радіус-вектора траєкторій, отриманими за математичною моделлю з ідеалізованими опорними поверхнями ГСО, експериментальні значення відрізняються в середньому в 1,5 раза, що свідчить про важливість врахування відхилень форми опорних поверхонь ГСО при дослідженні точності ШВ.

Максимальна розбіжність між експериментальними та теоретичними значеннями СКВ величини радіус-вектора траєкторій, отриманими за математичною моделлю, в якій враховано відхилення форми опорних поверхонь ГСО, не перевищує 14,3% - при регулюванні тиску в карманах ГСО та 43% - при варіюванні

частотою обертання шпинделя. Значна різниця між експериментальними та теоретичними значеннями СКВ траєкторій шпинделя при варіюванні частотою обертання шпинделя пояснюється впливом відцентрової сили інерції, зумовленої наявністю статичного дисбалансу, на віброактивність ШВ, параметри якої достатньо складно адекватно аналітично описати в математичній моделі.



1 – експериментальна залежність, 2 – теоретична залежність з урахуванням відхилень форми опорних поверхонь ГСО, 3 – теоретична залежність з ідеалізованими опорними поверхнями ГСО

Рисунок 16 – Порівняння експериментальних та теоретичних залежностей математичного сподівання та СКВ радіус-вектора траєкторій від тиску в карманах ГСО а) і б) при  $n=1500 \text{ хв}^{-1}$  та частоти обертання шпинделя в) і г) при  $p_k=3 \text{ МПа}$

Обґрунтованість виявлених закономірностей формування показників точності ШВ оцінювали шляхом встановлення взаємозв'язку статистичних характеристик траєкторій руху шпинделя та контурів оброблених поверхонь зразків-виробів при регулюванні тиску, температури мастила в ГСО, частоти обертання шпинделя. Таку оцінку здійснили за результатами спектрального аналізу (рисунок 17) через порівняння математичних сподівань амплітуд суттєвих гармонік контуру поперечного перерізу зразків-виробів та траєкторій радіус-вектора шпинделя, приведених до безрозмірного вигляду. Ступінь взаємозв'язку оцінювали за коефіцієнтом кореляції  $r_{\Delta Am}$  між масивами значень амплітуд гармонік (рисунок 18).

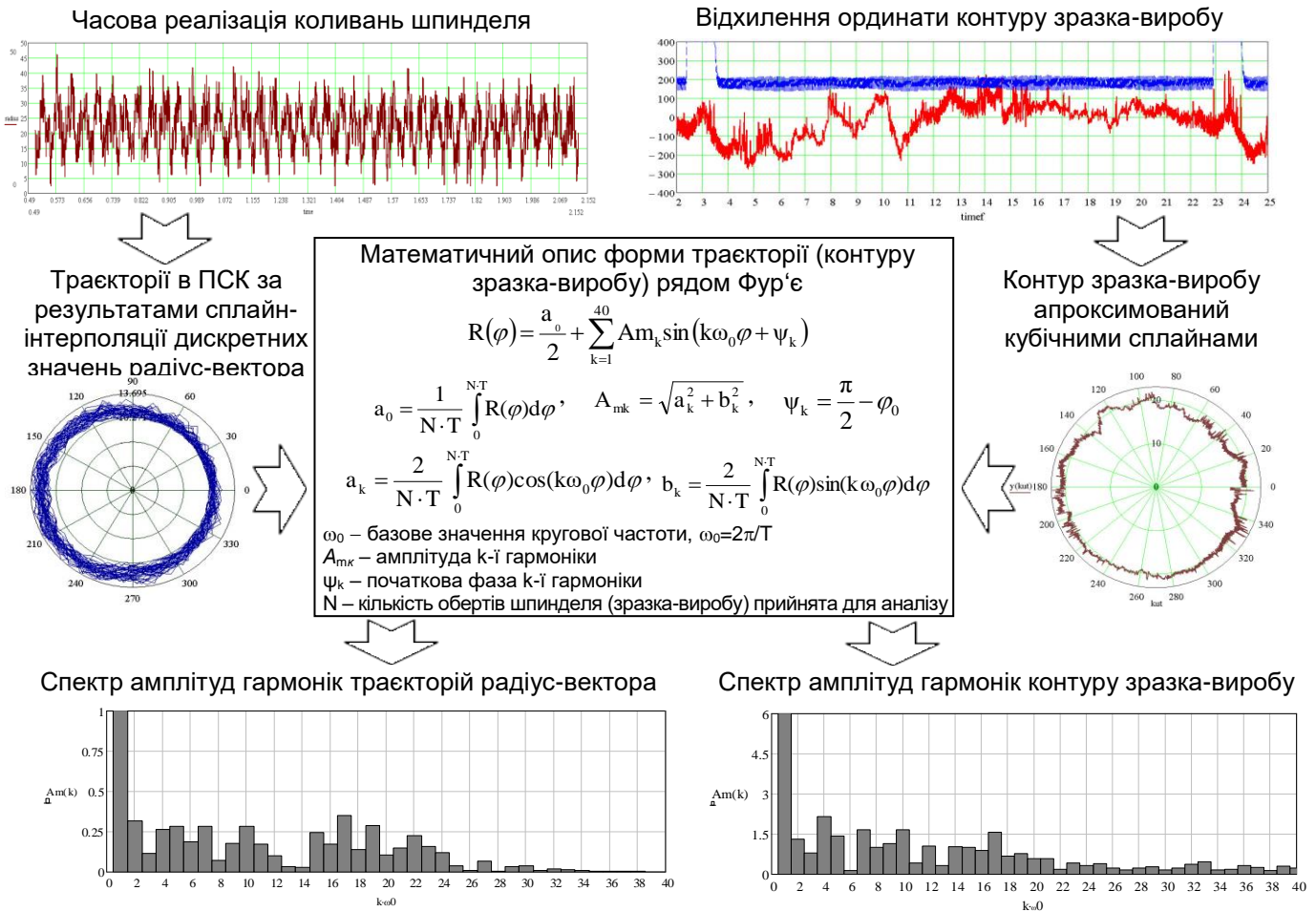


Рисунок 17 – Структурна схема спектрального аналізу траєкторій шпинделя та контуру зразків-виробів

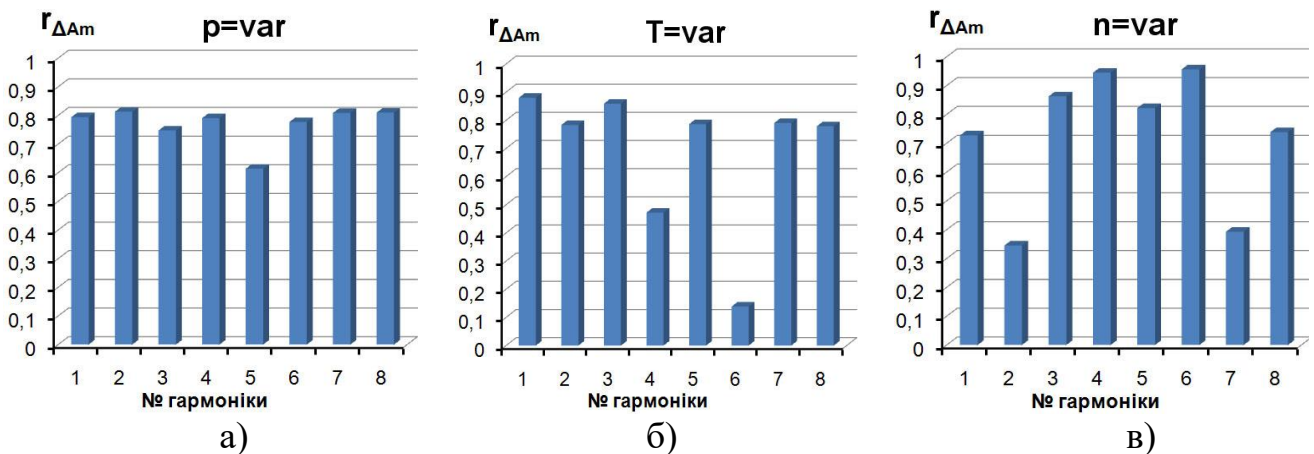
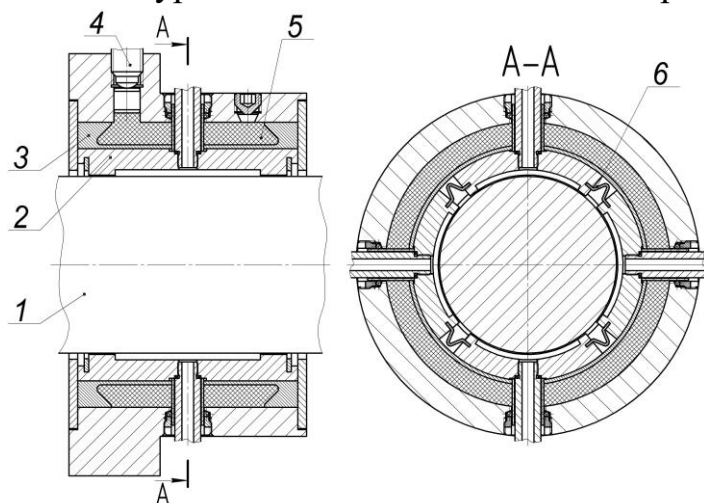


Рисунок 18 – Значення коефіцієнтів парної кореляції між масивами значень амплітуд гармонік №1-8 контурів поперечного перерізу зразків-виробів та траєкторій радіус-вектора шпинделя при варіюванні тиском а), температурою мастила б) в карманах ГСО, частоти обертання шпинделя в)

Результати визначення коефіцієнта парної кореляції між масивами значень амплітуд гармонік свідчать, що при регулюванні тиску в карманах ГСО забезпечується найбільш стійкий взаємозв'язок між статистичними характеристиками траєкторій шпинделя та геометричними відхиленнями форми оброблених поверхонь зразків-виробів, що обґрунтовує доцільність регулювання тиску в карманах ГСО для підвищення показників точності ШВ.

У п'ятому розділі наведена практична реалізація результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

Запропонована методика та практичні рекомендації щодо вибору раціональних експлуатаційних та конструктивних параметрів ГСО з метою підвищення показників точності при токарній обробці на верстатах з регульованими ГСО шпинделя. Ця методика може бути використана при проектуванні широкої номенклатури технологічних машин з опорними гідростатичними вузлами.



1 – шпиндель, 2 – сегмент, 3 – пружна тонкостінна втулка, 4 – гвинт,  
5 – гідропластмаса, 6 – пружина

Рисунок 19 – Конструктивна схема регульованого сегментного гідростатичного підшипника

Розроблена нова конструкція регульованого сегментного гідростатичного підшипника (рисунок 19), в якому підвищення рівномірності регулювання радіального зазору забезпечується за рахунок одночасного радіального переміщення 4-х сегментів 2 внаслідок деформування пружної тонкостінної втулки 3 під дією тиску гідропластмаси 5, який створюється обертанням гвинта 4. Виконання охоплюючої поверхні гідростатичного підшипника збірною з 4-х окремих сегментів, з'єднаних пружинами спеціальної форми 6, дозволило підвищити технологічність, ремонтоздатність, опори та

розширити номенклатуру конструкційних матеріалів для виготовлення деталей.

З метою підвищення швидкохідності ШВ запропонована конструкція регульованого радіального гідростатодинамічного підшипника (патент на корисну модель №89288), в якому підведення спеціальної малов'язкої рідини до несучих карманів сферичної форми здійснюється через регульовані клапани витрат. Виконання карманів підшипника сферичної форми дозволяє зменшити втрати потужності на в'язке тертя при збільшенні швидкостей обертання. Застосування регульованих клапанів витрат для живлення підшипника дозволяє при зростанні частоти обертання шпинделя зменшити подачу робочої рідини до карманів опори, в результаті чого підшипник переходить до гідродинамічного режиму роботи, тим самим зменшуючи втрати потужності як на в'язке тертя, так і на прокачування робочої рідини. Це забезпечило підвищення швидкохідності підшипника до  $2 \cdot 10^6$  мм·хв<sup>-1</sup>.

Розроблено практичні рекомендації з вибору раціональних режимів різання та експлуатаційних параметрів шпиндельних ГСО при чистовій токарній обробці конструктивно неврівноважених заготовок.

Запропоновано технологічні засоби підвищення точності ГСО з пружними корпусними елементами, які дозволяють значно знизити вплив похибки закріплення на точність форми опорної поверхні гідростатичної втулки. Це забезпечило зниження впливу технологічної спадковості на величину радіального зазору між спряженими поверхнями підшипника.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова задача, яка полягає у підвищенні точності ШВ шляхом розробки нових конструкцій опорних вузлів регульованого типу та встановлення закономірностей формування показників точності ШВ з одночасним урахуванням похибок форми, температурних деформацій опорних поверхонь, випадкового характеру експлуатаційних параметрів шпindelних ГСО та технологічних навантажень. Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Ефективним напрямком підвищення точності верстатів є керування вихідними параметрами точності обертання шпинделя на основі застосування ГСО регульованого типу.
2. Вперше на основі створеної математичної моделі траєкторій руху шпинделя в зосереджених параметрах встановлено закономірності впливу геометричних відхилень форми, температурних деформацій опорних поверхонь підшипника, випадкових та детермінованих складових технологічних навантажень, експлуатаційних параметрів ГСО на показники точності шпindelного вузла. Це дозволило підвищити на 30–60% точність визначення положення шпинделя за показником траєкторій переміщень.
3. Встановлено, що врахування похибок форми в поперечному напрямку та температурних деформацій опорних поверхонь ГСО при моделюванні траєкторій руху шпинделя призводить до зростання статистичних характеристик радіус-вектора траєкторій: математичного сподівання – на 30 %, середньоквадратичного відхилення – на 12,5 % порівняно з ідеалізованими опорними поверхнями підшипника.
4. За результатами обчислювального експерименту встановлено та експериментальним шляхом підтверджено статистичні закономірності формування геометричної точності токарного верстата за показником точності траєкторій переміщення шпинделя на ГСО:
  - підвищення частоти обертання шпинделя в діапазоні 600–2400 хв<sup>-1</sup> при наявності статичного дисбалансу обертових елементів ШВ обумовлює зростання в 1,6–2,1 раза математичного сподівання та в 2,5–3,4 раза СКВ радіус-вектора траєкторій шпинделя;
  - раціональна величина тиску в карманах ГСО, при якій забезпечуються мінімальні значення математичного сподівання та СКВ радіус-вектора траєкторій, знаходиться в діапазоні 3–3,5 МПа;
  - підвищення температури робочої рідини в ГСО в діапазоні +20°...+40°С призводить до зростання в 4,2–6,2 рази математичного сподівання радіус-вектора траєкторії шпинделя, при цьому зі збільшенням тиску в карманах ГСО ця тенденція уповільнюється; вплив температури робочої рідини на СКВ радіус-вектора траєкторії шпинделя незначний.
5. Експериментальним шляхом встановлено статистичні закономірності формування точності ШВ токарного верстата за показником відхилення від круглості зразків-виробів залежно від режимів різання, температури та тиску в карманах ГСО шпинделя за наявності статичного дисбалансу обертових елементів ШВ, а саме:

- збільшення глибини різання зумовлює пропорційне зростання відхилення від круглості оброблених поверхонь зразків-виробів;
  - при підвищенні частоти обертання шпинделя до  $1200 \text{ хв}^{-1}$  математичне сподівання відхилення від круглості поверхонь зразків-виробів має тенденцію до незначного (в межах 20%) зниження, а при подальшому зростанні частоти в межах робочого діапазону математичне сподівання відхилення від круглості підвищується на 45-80 %;
  - при сталій частоті обертання шпинделя та мінімальних величинах глибини різання і подачі на оберт, що відповідають чистовій обробці, збільшення статичного дисбалансу на відхилення від круглості оброблених зразків-виробів практично не впливає;
  - зі зростанням тиску в карманах ГСО вплив подачі на відхилення від круглості зменшується і при величині тиску 4,5–5 МПа подача на відхилення від круглості практично не впливає;
  - раціональний діапазон тиску в карманах ГСО з точки зору мінімізації відхилення від круглості поверхонь зразків-виробів становить 3–3,5 МПа;
  - підвищення температури робочої рідини в ГСО до  $+40^{\circ}\text{C}$  призводить до зростання в 1,5–2 рази математичного сподівання відхилення від круглості оброблених поверхонь зразків-виробів, з підвищенням тиску в ГСО до 4,5 МПа вплив температури на точність форми оброблених поверхонь мінімізується.
6. За результатами спектрального аналізу встановлено корельованість математичних сподівань суттєвих гармонік спектрів траєкторій радіус-вектора шпинделя та спектрів контурів оброблених поверхонь зразків-виробів при зміні експлуатаційних параметрів ШВ. Найбільш стійкий взаємозв'язок між статистичними характеристиками траєкторій шпинделя та геометричними відхиленнями форми оброблених поверхонь зразків-виробів встановлено при регулюванні тиску в карманах ГСО.
7. Розроблено науково обґрунтовану методику вибору раціональних експлуатаційних та конструктивних параметрів ГСО регульованого типу з метою підвищення точності механічної обробки на токарних верстатах.
8. Розроблено схемні рішення конструкцій регульованих гідравлічних опор, що дозволяють підвищити у 1,3–1,5 рази точність регулювання величини радіального зазору, швидкохідність ШВ до  $2 \cdot 10^6 \text{ мм} \cdot \text{хв}^{-1}$ , технологічність виготовлення опор та розширити номенклатуру конструкційних матеріалів для їх виготовлення.
9. Запропоновано технологічні засоби підвищення точності гідростатичних підшипників з пружними корпусними елементами, які дозволяють на порядок знизити вплив технологічної спадковості на величину радіального зазору між спряженими поверхнями підшипника.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації***Публікації у фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних**

1. Сапон С. П. Методика експериментального визначення точності обертання шпинделя / С. П. Сапон // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія технічні науки. – 2013. – №1(63). – С. 66–74
2. Федориненко Д. Ю. Вплив температурних деформацій гідростатичних опор на вихідні показники точності шпиндельного вузла / Д. Ю. Федориненко, С. П. Сапон, С. В. Бойко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2013. – № 2(68). – С. 55–60. *(Здобувачем розроблена методика та проведено аналіз результатів експериментальних досліджень)*
3. Федориненко Д. Ю. Точність шпиндельних вузлів на регульованих гідростатичних опорах / Д. Ю. Федориненко, С. В. Бойко, С. П. Сапон // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2013. – № 3(69). – С. 145–149. *(Здобувачем здійснено аналіз результатів експериментальних досліджень)*

**Публікації у фахових виданнях**

4. Федориненко Д. Ю. Експериментальний стенд для дослідження шпиндельних гідростатичних опор / Д. Ю. Федориненко, С. В. Бойко, С. П. Сапон // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2010. - №45. – С. 99–105. *(Здобувачем здійснено опис конструкції стенда та визначено похибку вимірювання)*
5. Федориненко Д. Ю. Вплив експлуатаційних параметрів на характеристики гідростатичних опор шпинделя / Д. Ю. Федориненко, С. П. Сапон // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. – 2011. – Вип. 31. – С. 396–402. *(Здобувачем здійснено обробку результатів експериментальних досліджень та представлення їх у вигляді графічних залежностей)*
6. Федориненко Д. Ю. Підвищення точності обертання шпинделя засобами мехатронних систем / Д. Ю. Федориненко, С. А. Іванець, С. П. Сапон // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія технічні науки. – 2011. – №3(51). – С. 49–57. *(Здобувачем розроблена принципова схема мехатронної системи керування точністю обертання шпинделя)*
7. Сапон С. П. Підвищення точності регульованих радіальних гідростатичних опор шпинделя / С. П. Сапон, С. В. Бойко // Наукові праці Донецького національного технічного університету (Серія гірничо-електромеханічна). – 2011. – Вип. 22(195). – С. 218–227. *(Здобувачем розроблена конструкція регульованої ГСО)*
8. Федориненко Д. Ю. Вплив технологічної спадковості на точність регульованих шпиндельних гідростатичних опор / Д. Ю. Федориненко, С. П. Сапон, С. В. Бойко // Технологічні комплекси. – 2012. – № 1,2 (5,6). – С. 176–182. *(Здобувачем розроблена методика вимірювання та аналізу показників точності опорної поверхні гідростатичної втулки)*
9. Федориненко Д. Ю. Пошук просторової функції тиску в регульованому радіальному гідростатичному підшипнику засобами системи CosmosFloWorks / Д. Ю. Федориненко, С. В. Бойко, С. П. Сапон // Промислова гідравліка і



- пневматика. – 2012. – № 2(36). – С. 61–65. *(Здобувачем здійснено обробку результатів досліджень та представлення їх у вигляді графічних залежностей)*
10. Вплив експлуатаційних параметрів шпindelного вузла з гiдростатичними опорами на точнiсть обробки/ Д. Ю. Федориненко, С. П. Сапон, А. А. Урлiна, С. В. Бойко // Науковi нотатки. Мiжвузiвський збiрник. – 2013. – Випуск 41 (частина 1). – С. 254–259. *(Здобувачем зiдiйснено планування та проведення експериментальних досліджень)*
11. Сапон С. П. Експериментальне визначення траєкторiй руху шпindelя на гiдростатичних опорах / Сапон С. П., Аванесов Є. В. // Науковий вiсник ДДМА. – 2013. – № 1(11Е). – С. 93–99. *(Здобувачем розроблена методика експериментального визначення траєкторiй руху шпindelя)*

### ***Опубліковані праці апробаційного характеру***

12. Федориненко Д. Ю. Пiдвищення точностi обертання шпindelя засобами мехатронних систем / Д. Ю. Федориненко, С. А. Иванець, С. П. Сапон // Комплексне забезпечення якостi технологiчних процесiв та систем: матерiали I мiжнар. наук.-практ. конф., 17–19 травня 2011 р., м. Чернiгiв. – Чернiгiв, 2011. – С. 52. *(Здобувачем визначенi показники вихiдної точностi обертання шпindelя)*
13. Сапон С. П. Компенсацiя кутових змiщень рухомих пелюсткiв регульованої гiдростатичної втулки / С. П. Сапон // Матерiали II мiжнародної науково-практичної конференцiї «Комплексне забезпечення якостi технологiчних процесiв та систем». Чернiгiв, 23 - 25 травня 2012 р. – Чернiгiв: ЧДТУ, 2012. – С. 21–22.
14. Федориненко Д.Ю. Технологiчне забезпечення точностi форми опорних поверхонь гiдростатичних пiдшипникiв / Д.Ю. Федориненко, С.П. Сапон // XIII Мiжнародна науково-технiчна конференцiя «Промислова гiдравлiка i пневматика». Чернiгiв, 19 - 20 вересня 2012 р.: матерiали конференцiї. – Вiнниця: ГЛОБУС-ПРЕС, 2012. – С. 72. *(Здобувачем запропонованi технологiчні засоби пiдвищення точностi форми опорних поверхонь гiдростатичних пiдшипникiв)*
15. Сапон С. П. Експериментальнi дослідження показникiв точностi шпindelного вузла на гiдростатичних опорах /С. П. Сапон, Д. Ю. Федориненко, С. В. Бойко //Комплексне забезпечення якостi технологiчних процесiв та систем (КЗЯТПС-2013). Збiрка тез III мiжнародної науково-технiчної конференцiї, 14–16 травня, Чернiгiв, Україна. – Чернiгiв: ЧДТУ, 2013. – С. 50–51. *(Здобувачем зiдiйснено планування та проведення експериментальних досліджень).*
16. Урлiна А. А. Аналіз точностi опорної поверхнi регульованого гiдростатичного пiдшипника/ А. А. Урлiна, Д. Ю. Федориненко, С. П. Сапон // Новiтнi технологiї у науковiй дiяльностi i навчальному процесi: Всеукраїнська науково-практична конференцiя студентiв, аспiрантiв та молодих учених: тези доповiдей: в 2-х т. – Т.1. Технiчні та економiчні науки. – Чернiгiв: ЧДТУ, 2013. – С.76. *(Здобувачем розроблена методика оцiнки точностi опорних поверхонь гiдростатичних пiдшипникiв)*
17. Федориненко Д. Ю. Вплив температурних деформацiй гiдростатичних опор на просторовi характеристики шпindelного вузла / Д. Ю. Федориненко, С. В. Бойко, С. П. Сапон // Матерiали мiжнародної науково-технiчної конференцiї «Гiдроаеромеханiка в iнженернiй практицi», Киiв, 21–24 травня 2013 р. – К.,

2013. – С. 57–58. *(Здобувачем виконано експериментальні дослідження та оброблені їх результати)*

18. Федориненко Д. Ю. Точність шпindelних вузлів на регульованих гідростатичних опорах/ Д. Ю. Федориненко, С. В. Бойко, С. П. Сапон// XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», Севастополь, 25 - 28 черв. 2013р.: матеріали конференції. – К., 2013р. – Ч.2. – С. 98. *(Здобувачем проведено експериментальні дослідження траєкторій обертання шпінделя прецизійного токарного верстата)*
19. Федориненко Д. Ю. Точність шпindelних вузлів на гідростатичних опорах/ Д. Ю. Федориненко, С. П. Сапон, С. В. Бойко // XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Промислова гідравліка і пневматика»: матеріали конференції; Одеса, 18–19 вересня 2013 р.,. – Вінниця: ГЛОБУС-ПРЕС, 2013. – С. 64. *(Здобувачем розроблена математична модель траєкторій руху шпінделя на ГСО та встановлено закономірності формування вихідної точності обертання шпінделя залежно від експлуатаційних параметрів ГСО та технологічних навантажень)*

**Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації**

20. Патент України на корисну модель 87488 UA, МПК F16C 32/06. Регульований радіальний гідростатичний підшипник / Федориненко Д.Ю., Сапон С.П., Бойко С.В.; заявник і патентовласник Чернігівський державний технологічний університет. – № u201310003; заявл. 12.08.2013; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 3. *(Здобувачем удосконалена конструкція пружної гідростатичної втулки)*
21. Патент України на корисну модель 89288 UA, МПК F16C 32/06. Регульований радіальний гідростатодинамічний підшипник / Федориненко Д.Ю., Сапон С.П., Хабіббуліна А.М.; заявник і патентовласник Чернігівський національний технологічний університет. – № u201314341; заявл. 09.12.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7. *(Здобувачем розроблена система живлення підшипника із застосуванням регульованих клапанів витрат)*

**АНОТАЦІЯ**

**Сапон С.П. Підвищення точності шпindelних вузлів на регульованих гідростатичних опорах. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Чернігівський національний технологічний університет, Чернігів, 2014.

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова задача підвищення точності механічної обробки шляхом розробки нових конструкцій шпindelних гідростатичних опор регульованого типу та встановлення статистичних закономірностей формування показників точності шпindelного вузла залежно від експлуатаційних параметрів гідростатичних опор та технологічних навантажень. На основі створеної математичної моделі траєкторій руху шпінделя встановлено та експериментальним шляхом підтверджено закономірності впливу геометричних відхилень форми, температурних деформацій опорних поверхонь підшипника, випадкових та детермінованих складових технологічних навантажень,

експлуатаційних параметрів гідростатичних опор на показники точності шпиндельного вузла. Розроблено науково обґрунтовану методику вибору раціональних експлуатаційних та конструктивних параметрів гідростатичних опор регульованого типу. Запропоновані нові схемні рішення конструкцій регульованих гідравлічних опор та технологічні засоби підвищення точності їх виконавчих поверхонь.

**Ключові слова:** гідростатична опора, шпиндельний вузол, регулювання, точність обробки, траєкторія.

### ABSTRACT

**Sapon S.P. Increasing the accuracy of spindle knots on adjustable hydrostatic supports. – Exercising the rights of the manuscript.**

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences by the, specialty 05.03.01 – machining processes, machines and tools. – Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, 2014.

In the dissertation work was solved actual scientific problem increasing machining accuracy by developing new designs hydrostatic spindle supports adjustable type and identify statistical regularities of formation of indicators precision spindle knots depending on the operational parameters of hydrostatic supports and technological loads. Based on created of a mathematical model trajectories spindle identified and experimentally confirmed laws of influence of geometric form deviations, thermal deformations of support surfaces of the bearing, random and deterministic components of technological loadings, operating parameters of hydrostatic supports on the performance precision spindle knot. Developed a scientifically based methods of choosing of rational operating and design parameters of hydrostatic supports adjustable type. New constructions adjustable hydraulic supports and technological means to improve the accuracy of their support surfaces was proposed.

**Key words:** hydrostatic support, spindle knot, adjustment, machining accuracy, trajectory.

### АННОТАЦИЯ

**Сапон С.П. Повышение точности шпиндельных узлов на регулируемых гидростатических опорах. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты. – Черниговский национальный технологический университет, Чернигов, 2014.

В диссертационной работе решена актуальная научная задача повышения точности механической обработки путем разработки новых конструкций шпиндельных гидростатических опор регулируемого типа и выявления статистических закономерностей формирования показателей точности шпиндельного узла в зависимости от эксплуатационных параметров гидростатических опор и технологических нагрузок.

Разработана математическая модель траекторий движения шпинделя в сосредоточенных параметрах, которая позволяет определить положение шпинделя

на основе учета одновременного влияния конструктивных параметров, геометрических отклонений формы, температурных деформаций опорных поверхностей подшипника, случайного характера эксплуатационных параметров гидростатических опор и технологических нагрузок. По результатам численного моделирования выявлены статистические закономерности формирования геометрической точности станка с гидростатическими опорами шпинделя по показателю точности траекторий перемещения шпинделя.

Для экспериментального подтверждения установленных закономерностей формирования показателей точности шпиндельного узла выполнены серии экспериментов, в результате которых адекватность математической модели и установленных закономерностей подтверждена.

Проведена оценка полученных моделированием и установленных экспериментальным путем закономерностей формирования показателей точности шпиндельного узла с гидростатическими опорами в зависимости от эксплуатационных параметров гидростатических опор и технологических нагрузок. Установлена взаимосвязь статистических характеристик траекторий движения шпинделя и контуров обработанных поверхностей образцов-изделий при регулировании давления, температуры масла в карманах гидростатических опор, частоты вращения шпинделя.

Разработана научно обоснованная методика, алгоритм, программное обеспечение для выбора рациональных эксплуатационных и конструктивных параметров гидростатических опор регулируемого типа. Разработаны новые конструкции регулируемых гидравлических опор позволяющие повысить точность и быстроходность шпиндельного узла. Предложены технологические средства повышения точности отверстий гидростатических подшипников.

**Ключевые слова:** гидростатическая опора, шпиндельный узел, регулировка, точность обработки, траектория.



Підп. до друку 20.05.2014 р. Формат 60x84/16.  
Папір офсетний. Друк різнографія. Автор. арк. 0,9.  
Тираж 120 пр. Замов. № 212/14.

---

Редакційно-видавничий відділ Чернігівського державного технологічного університету  
14027, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95  
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів  
видавничої продукції Серія ДК №840 від 04.03.2002 р.