

УДК 621.822.172:621.9

Д.Ю. Федориненко\*, к.т.н., С.П. Сапон\*\*, С.В. Бойко\*\*, к.т.н.

\*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

\*\*Чернігівський державний технологічний університет

## ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СПАДКОВОСТІ НА ТОЧНІСТЬ РЕГУЛЬОВАНИХ ШПИНДЕЛЬНИХ ГІДРОСТАТИЧНИХ ОПОР

*На основі спектрального аналізу контуру опорної поверхні гідростатичної втулки регульованої радіальної шпindelної опори визначено вплив технологічної спадковості на формування показників точності. Наведена методика вимірювання та аналізу показників точності опорної поверхні гідростатичної втулки.*

Шпindel, гідростатична опора, гідростатична втулка, технологічна спадковість, спектральний аналіз, радіальний зазор, відхилення від круглості.

### Вступ

Проблема підвищення довговічності і надійності машин нерозривно пов'язана із забезпеченням заданих експлуатаційних властивостей деталей і з'єднань, які залежать від матеріалу, розмірної точності та якості виконавчих поверхонь.

Одними з найважливіших параметрів, що визначають експлуатаційні властивості гідростатичних опор (ГСО) є точність форми і розмірів їх опорних поверхонь, які чинять безпосередній вплив на розміри та форму радіального зазору. Величина і форма зазору визначають товщину мастильного шару та істотно впливають на витратні характеристики опор, несучу здатність, жорсткість [1] та вихідну точність обертання шпindelя [2].

Точність форми опорних поверхонь гідростатичних підшипників залежить від конструкції та технології їх виготовлення. Формування необхідного комплексу експлуатаційних властивостей відбувається протягом всього технологічного процесу виготовлення деталей, починаючи із заготівельної і закінчуючи фінішними операціями. При остаточному шліфуванні деталей ГСО на опорних поверхнях підшипника формуються відхилення від круглості в його поперечному перетині. Причому, для шпindelя найбільшого значення набуває овальність, для гідростатичної втулки характерна похибка з кількістю хвиль до шести [3]. Отримані показники якості на шліфувальній операції є наслідком впливу багатьох факторів, одним з яких є технологічна спадковість обумовлена конструкцією та технологією виготовлення деталей опор.

Слід відмітити, що існуючі дослідження впливу макровідхилень опорних поверхонь шпindelних ГСО на величину зазору та розподіл тиску [4,5], точнісні характеристики [6,7] носять переважно якісний характер, або просто обмежуються констатацією фактів впливу, не розкриваючи питань походження похибок геометричної форми поверхонь. Тому, дослідження спрямовані на виявлення причин зниження точності геометричної форми опорних поверхонь ГСО є актуальною науковою задачею.

### Основний зміст і результати роботи

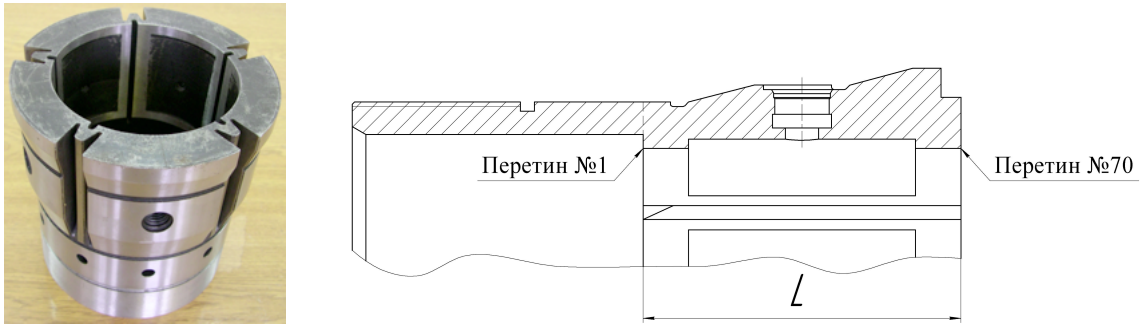
Авторами монографії [3] запропоновані нові способи керування геометричними параметрами та витратними характеристиками ГСО шпindelів на основі застосування деформованих гідростатичних втулок. Там же відмічено, що експлуатаційні характеристики опор значною мірою залежать від точності спряжених опорних поверхонь.

Задачею даної роботи є дослідження впливу технологічної спадковості на точність опорної поверхні регульованої гідростатичної втулки та вихідні характеристики ГСО.

Точність гідростатичної втулки спеціальної конструкції [8] оцінювалася за показниками відхилень від круглості її опорної поверхні. Для цього за допомогою кругломіра моделі 289 здійснено вимірювання відхилень від круглості по довжині її опорної поверхні L в 70-ти поперечних перетинах з кроком між сусідніми перетинами 1 мм. (рис.1, б).

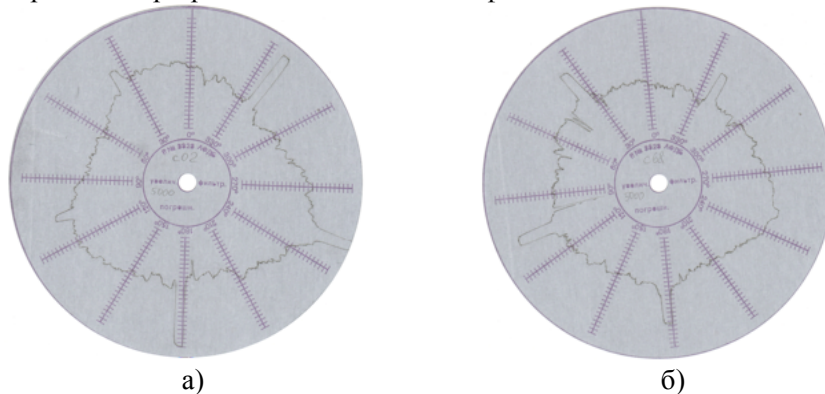
Таким чином, опорна поверхня гідростатичної втулки довжиною 70 мм вкрита рівномірною сіткою перетинів, в яких визначалося відхилення радіальної координати внутрішньої циліндричної поверхні. Це дозволило оцінити похибки форми втулки в тангенціальному та аксіальному напрямках підшипника.

Характерною особливістю гідростатичної втулки є наявність груп поздовжніх пазів, що призначені для забезпечення можливості її деформування в напрямку регулювання зазору в ГСО. Зазначені пази утворюють переривчастий профіль опорної поверхні втулки.



а) б)  
Рис. 1 Загальний вигляд дослідного зразка гідростатичної втулки а) та схема розташування перетинів по довжині її опорної поверхні L б)

На рис. 2 приведені круглограми опорної поверхні втулки в 2-му (рис. 2 а) і 68-му (рис. 2 б) поперечних перетинах при різних масштабних коефіцієнтах.



а) б)  
Рис. 2. Круглограми опорної поверхні гідростатичної втулки при збільшенні 5000: а) – перетин №2 б) – перетин №68

Круглограми опорної поверхні мають незначні прояви хвилястості з амплітудою до 5 мкм та періодом хвиль 3...4° по куту. На круглограмах чітко простежується огранювання поверхні з числом граней 3 та 5. Мають місце на опорній поверхні риски з глибиною западини 7...15 мкм, які є наслідком технології виготовлення втулки і утворені в результаті контактування опорної поверхні із зовнішньою конічною поверхнею оправки, яка використовувалась для базування по осі опорної поверхні втулки при остаточній обробці конічних поясків.

Для аналізу частотного складу круглограм здійснено їх спектральний аналіз. Для математичного опису форми опорної поверхні втулки здійснена інтерполяція дискретних значень ординат контуру перерізу кубічними сплайнами. Для цього використані вбудовані функції cspline і interp пакету MathCAD. Круглограма профілю одержана сплайн-інтерполяцією дискретних значень профілю опорної поверхні наведена на рис. 3.

Математичний опис контуру опорної поверхні виконано за допомогою ряду Фур'є, що включає 80 гармонік. Враховуючи, що період дискретно заданої функції  $T \neq 2\pi$ , форма поперечного перерізу подана у вигляді залежності:

$$r(\varphi) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{80} A m_k \sin(k\omega_0\varphi + \psi_k), \quad (1)$$

де  $\omega_0$  – базове значення кругової частоти,  $\omega_0 = 2\pi/T$ .

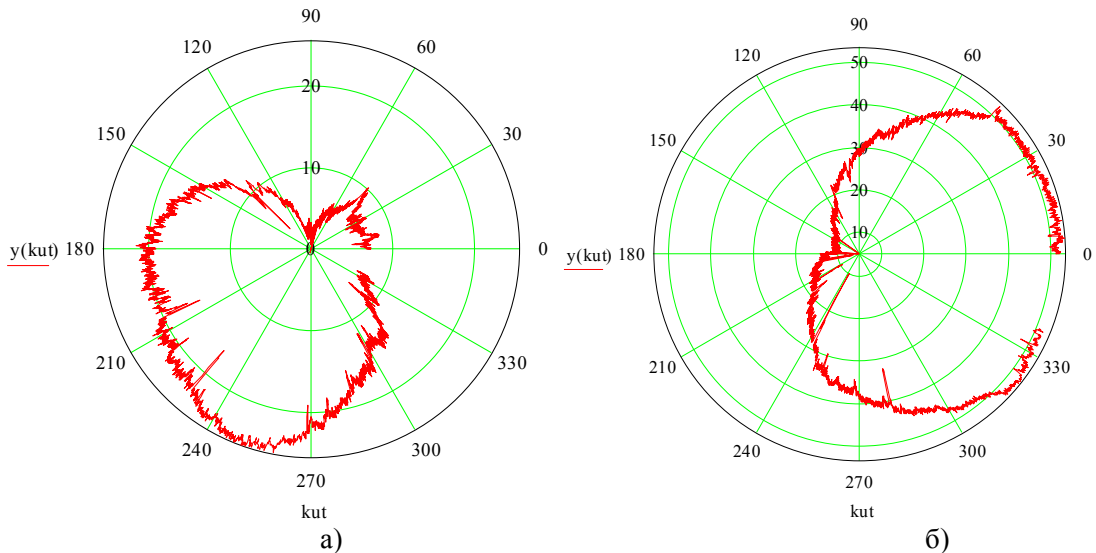


Рис. 3. Опис форми опорної поверхні втулки кубічними сплайнами: а) – перетин №2; б) перетин № 68

В програмному середовищі MathCAD визначено коефіцієнти ряду Фур'є, амплітуд і початкових фаз гармонік, які утворюють спектр контуру опорної поверхні втулки. На рис. 4 наведено в різних масштабах спектр амплітуд  $Am_{k_0}$  ряду Фур'є контуру втулки в перетині №2.

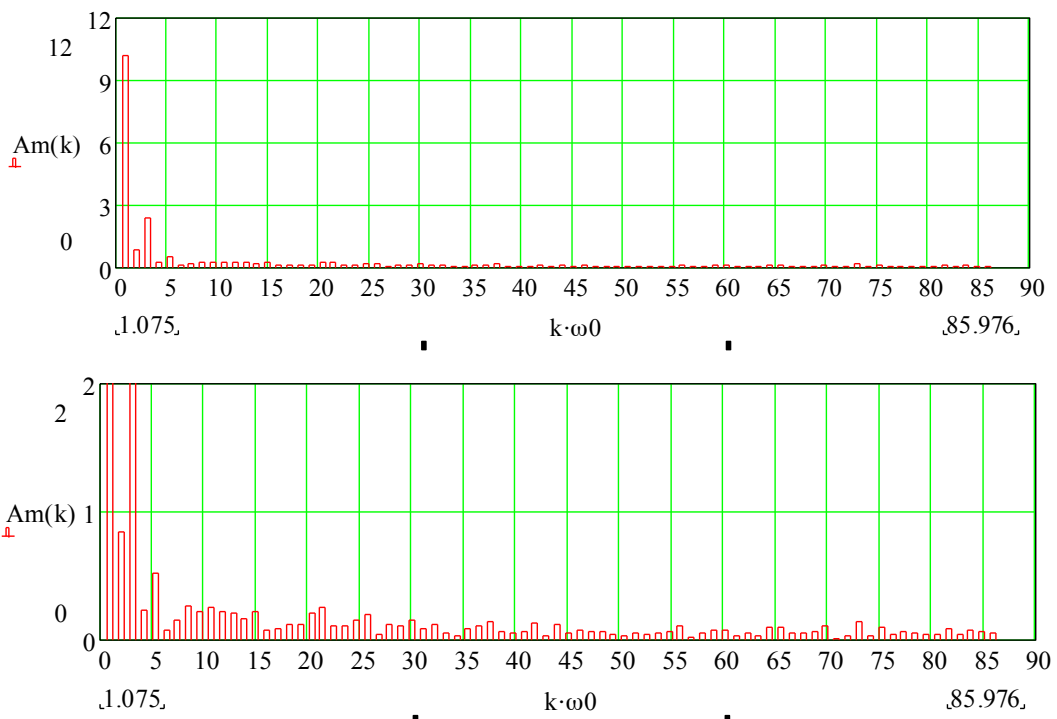


Рис. 4. Спектр амплітуд контуру опорної поверхні гідростатичної втулки в перетині №2 (графіки подані в різних масштабах по осі ординат)

На представлених спектрах суттєвими є амплітуди гармонік з номерами до п'ятої включно. Найбільше значення має перша гармоніка, яка характеризує ексцентриситет контуру опорної поверхні втулки. В спектрі простежуються гармоніки, що характеризують огранювання поверхні, причому найбільшого амплітудного значення приймають гармоніки з номерами 3 та 5. Найявна також друга гармоніка, що характеризує овальність контуру. Інші гармоніки мають нерегулярні зміни. Формування огранювання контуру опорної поверхні втулки з числом граней 3 та 5 пояснюється явищем технологічної спадковості технологічних баз та конструктивних форм відповідно.

Огранювання з трьома гранями виникає внаслідок використання трикулачкового самоцентрівного патрону при остаточній обробці опорної поверхні втулки. Внаслідок

деформації втулки з боку трьох кулачків патрону формується відповідне огранювання контуру обробленої поверхні. Огранювання з п'ятьма гранями формується внаслідок спадкування конструктивної форми втулки, що налічує п'ять груп поздовжніх пазів. При обробці ділянки втулки, утворені переривчастим профілем опорної поверхні, деформуються майже окремо, що обумовлює виникнення огранювання з п'ятьма гранями.

В спектрі на рис. 5, приведеному для перетину опорної поверхні втулки №68, простежується шоста суттєва гармоніка, яка кратна третій гармоніці і також обумовлена деформаціями втулки при використанні трикулачкового патрона для фінішної обробки опорної поверхні.

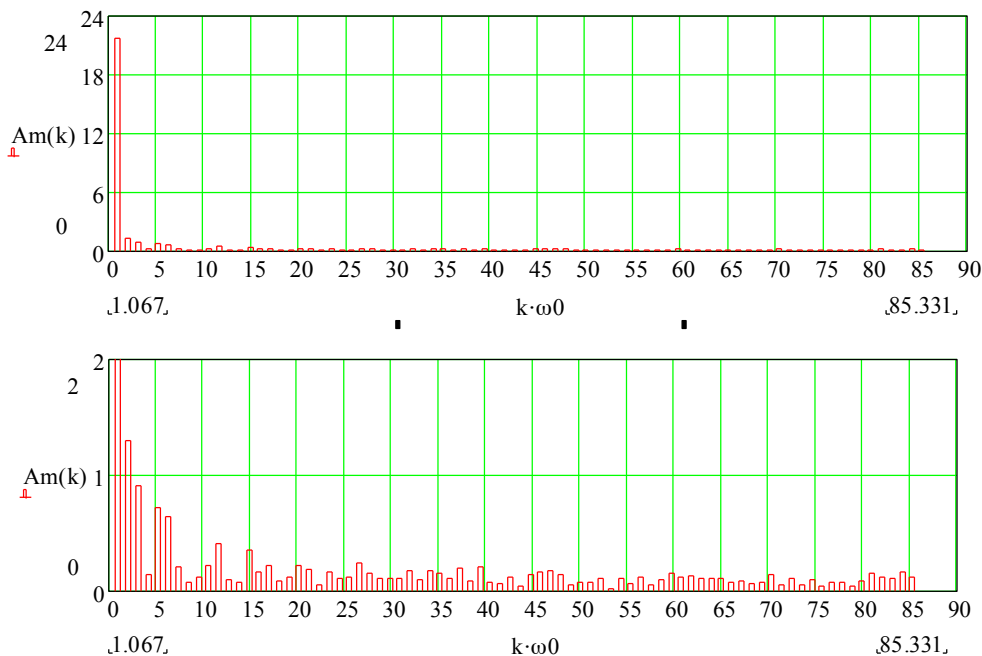


Рис. 5. Спектр амплітуд контуру опорної поверхні гідростатичної втулки в перетині №68 (графіки подані в різних масштабах по осі ординат)

Аналіз спектра на рис. 5 виявляє тенденцію зростання відхилення від круглості по довжині опорної поверхні (гармоніки з номерами 1, 2, 5, 6 майже в два рази зростають по відношенню до спектру контуру опорної поверхні в перетині №2), значення четвертої гармоніки лишається приблизно на постійному рівні, а величина третьої гармоніки зменшується. Явище зростання гармонік також обумовлюється технологічною спадковістю. Деформована гідростатична втулка по довжині має п'ять груп поздовжніх пазів, що приводить до формування неоднакових показників жорсткості в функції полярного кута. При остаточному шліфуванні опорної поверхні в якості технологічної бази використовувалася вісь зовнішньої циліндричної поверхні, розташованої між різцевою ділянкою та опорною поверхнею втулки. Тому радіальна жорсткість, враховуючи спосіб установки заготовки при обробці, зменшувалась по довжині консольної частини втулки, що призвело до відзначеного зростання відхилень від круглості по опорній довжині втулки.

Спектри початкових фаз  $\psi_{01}^6 \dots \psi_{06}^6$  контуру опорної поверхні втулки в перетинах №2 і №68, визначені засобами пакета MathCAD, наведено на рис. 6.

Статистичною обробкою спектрів амплітуд і початкових фаз гармонік в 70-ти перетинах опорної поверхні втулки отримано математичне сподівання амплітуд  $m_{Ak}$  та початкових фаз  $m_{\psi,k}$  суттєвих гармонік, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Статистичні характеристики амплітуд та початкових фаз спектра опорної поверхні гідростатичної втулки

|                      | Номер гармоніки k |      |       |       |      |      |
|----------------------|-------------------|------|-------|-------|------|------|
|                      | k=1               | k=2  | k=3   | k=4   | k=5  | k=6  |
| $m_{Ak}, \text{MKM}$ | 12,52             | 1,06 | 1,19  | 0,19  | 0,62 | 0,36 |
| $m_{\psi,k}, ^\circ$ | -34,3             | -9,5 | -64,2 | -48,5 | 15,4 | -2,1 |

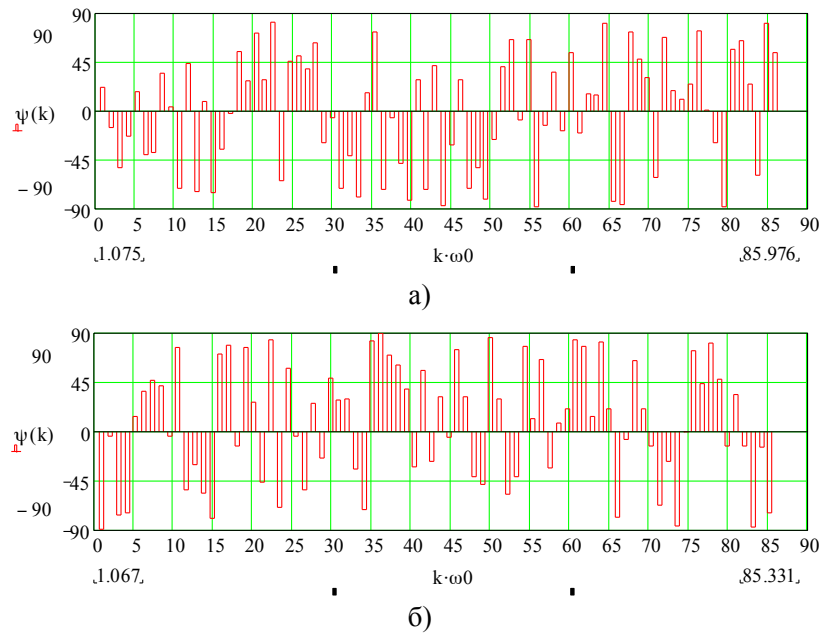


Рис. 6. Спектр початкових фаз контуру опорної поверхні гідростатичної втулки: а) – в перетині №2; б) – в перетині №68

Для нормування відхилень форми опорних поверхонь шпинделя та гідростатичної втулки в осьовому напрямку ГСО використовувались частинні відхилення профілю поздовжнього перетину, а саме: конусоподібність, бочкоподібність або сідлоподібність. Нормована ділянка зазначених відхилень форми, як правило, відповідає довжині  $L$  опорної поверхні підшипника. Для опису таких геометричних відхилень найбільш зручно застосовувати математичні моделі у вигляді поліноміальних залежностей.

Відхилення форми в осьовому напрямку ГСО оцінювалися за математичним сподіванням  $m_t$  відхилень радіальної координати контуру поперечного перетину по довжині  $l_{1п}$  окремої аксіальної перемички підшипника (рис. 7). Математичне сподівання визначалося за результатами вимірювання круглограм опорної поверхні гідростатичної втулки. Значення  $m_t$  визначені по довжині  $L$  опорної поверхні в 70-ти поперечних перетинах з кроком між сусідніми перетинами 1 мм.

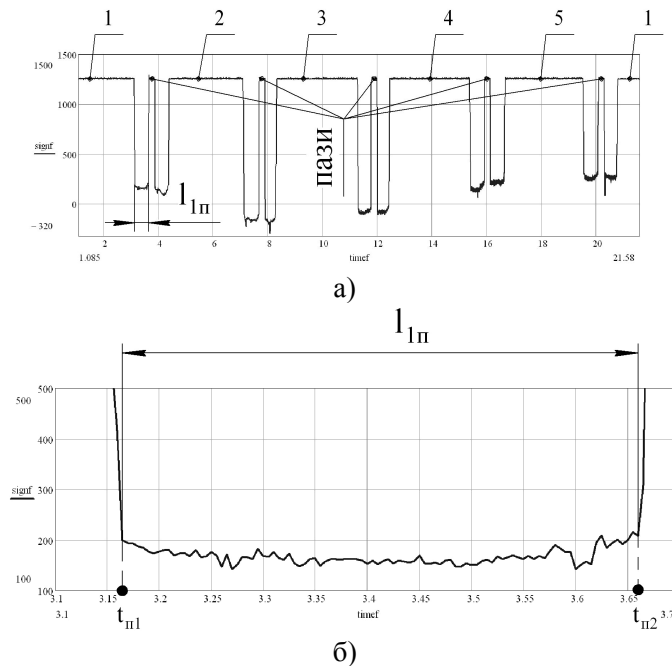


Рис. 7. Відхилення ординати контуру опорної поверхні гідростатичної втулки а) в перетині №35 (по центру підшипника) та визначення положення аксіальної перемички (в збільшеному масштабі) на осі часу б): 1...5 – сигнали з АЦП приладу, що відповідають геометричному розташуванню карманів за відповідним номером

Після попереднього налагодження кругломіра кутове положення гідростатичної втулки відносно точки початку вимірювання (початкового положення щупа) залишалося незмінним у всіх поперечних перетинах опорної поверхні. Це дає змогу ідентифікувати кармани і перемички втулки в часі вимірювання приладу. Для першої в часі вимірювання перемички (правої аксіальної перемички першого карману) засобами редагування графіків в пакеті MathCAD визначалися моменти часу  $t_{n1}$  і  $t_{n2}$  (див. рис. 7, б), які відповідають довжині  $l_{1n}$  перемички.

Для опису форми поздовжнього перетину опорної поверхні здійснена інтерполяція дискретних значень  $m_i$  кубічними сплайнами з використанням пакета MathCAD (рис.8)

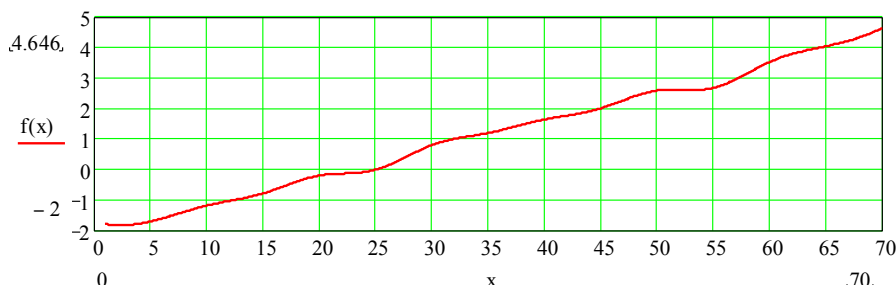


Рис. 8. Опис форми поздовжнього перетину опорної поверхні втулки кубічними сплайнами (значення по осі абсцис відповідають номеру поперечного перетину втулки)

Як видно з рис. 8, по довжині опорної поверхні втулки формується конусність в межах 6,4 мкм з незначними проявами хвилястості в перетинах 25 і 55. Причому конусність зростає до торця підшипника, що обумовлюється, як і у випадку з відхиленням від круглості, явищем технологічної спадковості.

З метою аналізу адекватності запропонованої методики визначення форми поздовжнього перетину здійснено оцінювання конусності опорної поверхні по двом циліндричним пояскам, утвореними аксіальними перемичками з двох боків карманів підшипника. Вимірювання здійснювалося в п'яти поздовжніх перетинах по середині карманів підшипника для кожного циліндричного пояска. Розраховане за результатами вимірювання математичне сподівання конусності становить 5,5 мкм. Напрямок конусності співпадає з попередньо отриманим (див. рис. 8), а розходження в результатах вимірювання на величину 0,9 мкм можна вважати прийнятним.

Розглянемо врахування конусності спряжених опорних поверхонь підшипника (шийки шпинделя в межах 2 мкм, втулки – 6,4 мкм) одночасно з деформаціями гідростатичної втулки та геометричними відхиленнями в тангенціальному напрямку опори. Причому врахуємо найгірший з точки зору вихідної точності обертання шпинделя випадок, коли конусності опорних поверхонь шпинделя і гідростатичної втулки (після деформування) мають протилежні знаки, що приводить до інтенсивнішого зменшення зазору по осі z. В результаті розрахунку отримані залежності несучої здатності  $\bar{W}$  ГСО в функції регульованого радіального зазору  $\delta_0$  (рис. 9,а) та ексцентриситету (рис. 9,б) з врахуванням перекосу, геометричних відхилень та деформації опорних поверхонь підшипника.

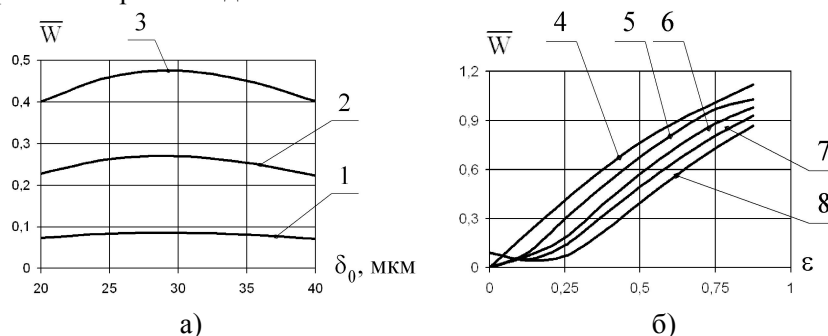


Рис. 9. Несуча здатність  $\bar{W}$  ГСП в функції регульованого радіального зазору  $\delta_0$  а) та в функції ексцентриситету  $\epsilon$  б): 1 –  $e=5$  мкм; 2 –  $e=10$  мкм; 3 –  $e=15$  мкм; 4 - ідеалізовані поверхні підшипника без врахування перекосу, геометричних відхилень та деформацій втулки; 5,6 - ідеалізовані поверхні з врахуванням перекосу при  $\epsilon_n=0,05$  та  $\epsilon_n=0,1$  відповідно; 7, 8 - з врахуванням перекосу, відхилень форми спряжених поверхонь, деформацій втулки при від  $\epsilon_n=0,05$  та  $\epsilon_n=0,1$  відповідно

З приведених графіків видно, що перекоп, геометричні відхилення та деформації опорних поверхонь підшипника суттєво впливають на несучу здатність ГСП, яка набуває екстремального значення при  $\delta_0=30\text{мкм}$ . Це пов'язано з тим, що в результаті деформацій втулки відбувається компенсація початкової конусності її опорної поверхні, яка обумовлена технологією виготовлення і існує до початку регулювання зазору, тобто без прикладання навантажень в спряженні „конічна втулка – гідростатична втулка” регульованої ГСО. В результаті зазор  $\delta_0$  в напрямку координати  $z$  підшипника стає рівномірним.

Подальше регулювання зазору  $\delta_0$  в бік зменшення приводить до погіршення вихідних характеристик ГСП, що обумовлено, насамперед, формуванням похибок форми втулки аксіальному напрямку підшипника під дією значних деформацій гідростатичної втулки. Отже, необхідний пошук конструктивних шляхів компенсації деформацій втулки в процесі регулювання зазору, які б дозволили зменшити мінімальне значення радіального зазору  $\delta_{\min}$  в опорі.

### Висновки

Встановлені закономірності формування похибок форми опорної поверхні регульованої гідростатичної втулки в залежності від спадковості її конструктивних форм, технологічних баз.

Виявлено вплив технологічної спадковості, деформацій та геометричних відхилень спряжених опорних поверхонь на несучу здатність підшипника. Встановлено, що найбільший вплив на вихідні характеристики підшипника чинять геометричні відхилення опорних поверхонь в тангенціальному напрямку опори, перекоп осі шпинделя, деформації гідростатичної втулки в процесі регулювання зазору. Геометричні відхилення опорних поверхонь втулки в аксіальному напрямку підшипника неістотно впливають на несучу здатність та радіальну жорсткість ГСП.

Для підвищення точності регульованих ГСО шпинделя необхідний пошук конструктивних та технологічних шляхів зменшення впливу технологічної спадковості на точність форми опорних поверхонь.

Розроблена методика оцінювання впливу технологічної спадковості на точність шпindelних ГСО, яка може бути використана для аналізу підшипників ковзання широкої номенклатури.

1. Коровчинский М.В. Прикладная теория подшипников жидкостного трения /Коровчинский М.В. – М.: МиС, 1954. – 186 с.

2. Бушуев В.В. Гидростатическая смазка в станках /В.В. Бушуев. – М.: Машиностроение, 1989. – 176 с.

3. Струтинський В.Б. Статистична динаміка шпindelних вузлів на гідростатичних опорах: монографія/ В.Б.Струтинський, Д.Ю.Федориненко. – Ніжин: ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2011. – 464с.

4. Соломин, О. В. Влияние макроотклонений опорных поверхностей на распределение давлений в радиальном подшипнике жидкостного трения [Текст] / О. В. Соломин, И. А. Данчин // Известия вузов. Машиностроение. - 2005. - №5. - с.24-31.

5. Данчин И.А. Влияние отклонение формы опорных поверхностей гидростатодинамических подшипников на динамические характеристики роторных систем. – Орел: ОрелГТУ, - 2007. – 161с.

6. Шатохин С. Н. Влияние некруглости опорных поверхностей на точность радиальных гидростатических подшипников шпинделя/ Шатохин С.Н., Секацкий В.С. //Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 7. – с.127-131.

7. Кашеневский Л.Я. Влияние некруглости шпинделя и отверстия гидростатического подшипника на радиальное биение оси шпинделя/Кашеневский Л.Я. // Станки и инструмент. – №12. – 1980. – с. 27 - 28.

8. Пат. 97685 UA, МПК F16C 32/06. Регульований радіальний гідростатичний підшипник / Струтинський В.Б., Федориненко Д.Ю., Бойко С.В.; заявник і патентовласник Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”. – № а201003534; заявл. 26.03.2010; опубл. 12.03.2012, Бюл. № 5.