

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТРАЄКТОРІЙ РУХУ ШПИНДЕЛЯ НА ГІДРОСТАТИЧНИХ ОПОРАХ

Сапон С. П., Аванесов Є. В.

Предложена методика экспериментального определения траекторий движения шпинделя с использованием высокоточных средств измерения. Приведена структурная схема и описание комплекса средств экспериментального исследования точности шпиндельных узлов с гидравлическими опорами. Определено влияние частоты вращения, силы резания и давления в карманах гидростатической опоры на среднеквадратичные отклонения положения оси шпинделя. Установлено, что частота вращения оказывает наибольшее влияние на рассеяние положения оси шпинделя при постоянной величине других эксплуатационных параметров. Стохастический характер траекторий обосновывает целесообразность применения для выявления и углубленного анализа сложных явлений в гидростатических опорах измерительной аппаратуры с высокой разрешающей способностью.

Запропонована методика експериментального визначення траєкторій руху шпинделя з використанням високоточних засобів вимірювання. Наведено структурну схему та описання комплексу засобів експериментальних досліджень точності шпиндельних вузлів з гідравлічними опорами. Визначено вплив частоти обертання, сили різання та тиску в карманах гідростатичної опори на середньоквадратичні відхилення положення осі шпинделя. Встановлено, що частота обертання найбільше впливає на розсіювання положення осі шпинделя при постійній величині інших експлуатаційних параметрів. Внаслідок стохастичного характеру траєкторій обґрунтовано доцільність застосування для виявлення і поглибленого аналізу складних явищ в гідростатичних опорах вимірювальної апаратури з високою роздільною здатністю.

The methods of experimental determination of the trajectories of the spindle using a high-precision measurement tools. Shows the structural diagram and description of the experimental complex of means for research precision spindles with hydraulic supports. Shows the trajectories and determined the effect of the rotational speed, the cutting force and the hydrostatic pressure in the pockets of support for the standard deviations of the axis of the spindle. The frequency of rotation has the most influence the dispersion of position of the spindle axis at a constant value of other operating parameters. Stochastic trajectories to justify the feasibility of detection and in-depth analysis of complex events in hydrostatic supports instrumentation with high resolution.

Сапон С. П.

ст. викл. ЧДТУ
s.sapon@gmail.com

Аванесов Є. В.

магістр ЧДТУ
yehoravanesov@gmail.com

УДК 621.822.172

Сапон С. П., Аванесов Є. В.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТРАЄКТОРІЙ РУХУ ШПИНДЕЛЯ НА ГІДРОСТАТИЧНИХ ОПОРАХ

Вагомою складовою точності верстата, що безпосередньо впливає на параметри оброблених деталей, є точність шпиндельного вузла на який припадає до 80 % загальної похибки металорізального верстата [1]. Істотний вплив на показники точності шпиндельних вузлів з гідростатичними опорами здійснюють технологічні навантаження процесу різання та експлуатаційні параметри опор. Одним з шляхів підвищення точності обертання шпинделя є вибір оптимальних експлуатаційних параметрів опор в залежності від технологічних навантажень на шпиндельний вузол. В якості основного вихідного інтегрального показника точності шпиндельного вузла рекомендовано використовувати траєкторію фіксованої точки шпинделя [1]. Параметри траєкторій тісно пов'язані з показниками точності оброблених деталей та корельовані з діючими на шпиндель експлуатаційними навантаженнями. Тому експериментальні дослідження впливу експлуатаційних навантажень на вихідні показники точності шпиндельного вузла є актуальною науковою задачею.

Перші напрацювання в області визначення траєкторій обертання заготовок та інструменту належать Соколовському А. П. [2]. Але низька точність запропонованих засобів вимірювання в сучасних умовах цю методику робить неактуальною. Дослідження траєкторій обертання шпинделя на опорах кочення з використанням вихреструмних безконтактних датчиків здійснено Юркевичем В. В. [3]. Однак обмежений частотний діапазон (до 1000 Гц) та похибка вимірювання в межах 3 мкм не дають змоги адекватно оцінити параметри траєкторій при прецизійній високошвидкісній обробці. В монографії [4] моделюванням в системі Matlab отримано траєкторії обертання шпинделя на регульованих гідростатичних опорах при варіюванні величинами радіального зазору та навантаження, яке сприймається шліфувальним шпинделем в процесі обробки заготовок. Значний обсяг теоретичних та експериментальних досліджень траєкторій обертання роторів на опорах рідинного тертя проведено під керівництвом професора Соломіна О. В. [5]. Таким чином, дослідження траєкторій обертання шпинделів ведуться достатньо тривалий час, однак сучасні тенденції розвитку машинобудування вимагають застосування більш точних способів їх визначення.

Метою роботи є експериментальне визначення впливу експлуатаційних навантажень на характеристики траєкторій обертання шпинделя на гідростатичних опорах.

Динамічна поведінка шпинделя на гідростатичних опорах (ГСО) визначається сукупністю діючих на нього сил, змінних як по величині так і за напрямком. Ці сили в комплексі зі складними нелінійними процесами в мастильному шарі здійснюють безпосередній вплив на характеристики траєкторій. При визначенні траєкторій руху шпинделя прецизійного верстату велике значення має точність вимірювального обладнання. Для досягнення цієї мети використовувалися безконтактні триангуляційні лазерні датчики виробництва фірми «Ріфтек», які мають можливість виводу вихідного сигналу як в аналоговій, так і цифровій формі, мають робочий діапазон 2мм, максимальну частоту дискретизації 9,4кГц та забезпечують точність вимірювання положення шпинделя в межах 0,2мкм. Для дослідження траєкторій шпинделя на ГСО використовувався комплекс засобів експериментальних досліджень (рис. 1), реалізований у вигляді експериментального стенду на базі прецизійного токарно-гвинторізного верстата моделі УТ16А (рис. 2).

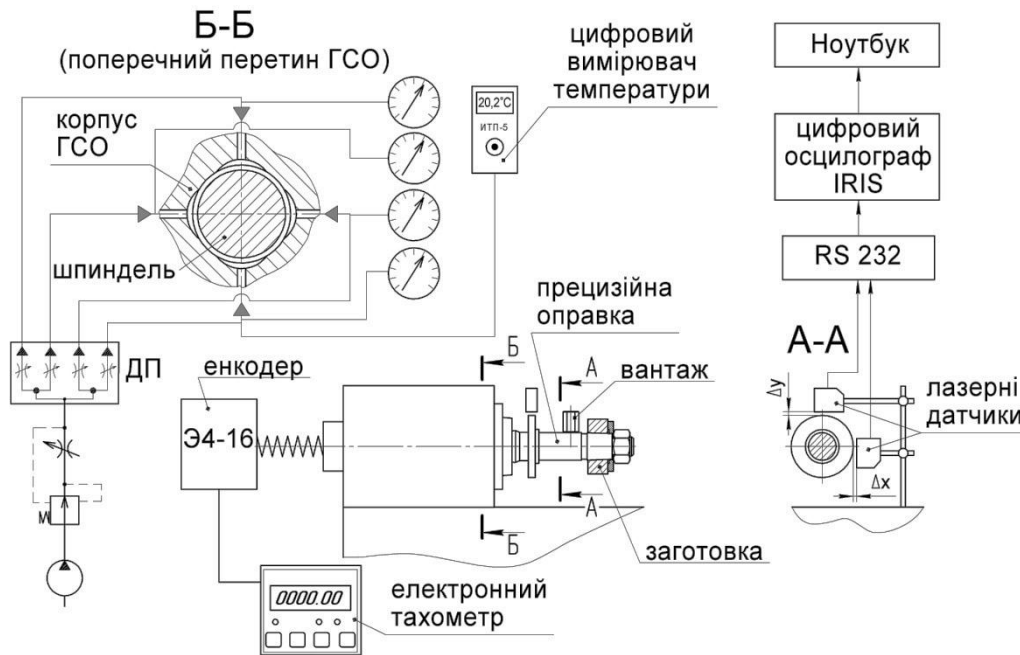


Рис.1. Структурна схема комплексу засобів експериментальних досліджень точності шпиндельного вузла на ГСО

Розроблений комплекс дозволяє здійснювати вимірювання радіальних зміщень Δx , Δy шпинделя у двох взаємоперпендикулярних напрямках, визначати тиск та температуру масла в карманах ГСО, частоту обертання шпинделя.

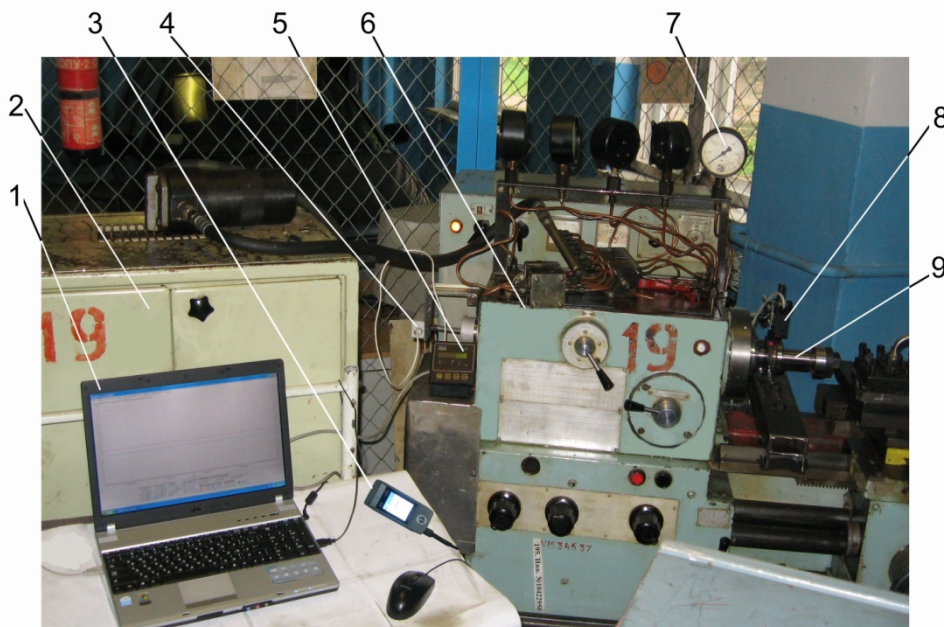


Рис. 2. Загальний вигляд експериментального станда:

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

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

Для визначення зміщень шпинделя у двох взаємоперпендикулярних напрямках використовувалася прецизійна оправка (рис. 3), що має контрольний поясок з яким взаємодіють лазерні датчики 3. Для оцінки впливу технологічних навантажень процесу різання на параметри траєкторій обертання шпинделя здійснювали обробку зразків-виробів 5 зі сталі 45, які закріплювали на конічній поверхні оправки 2.

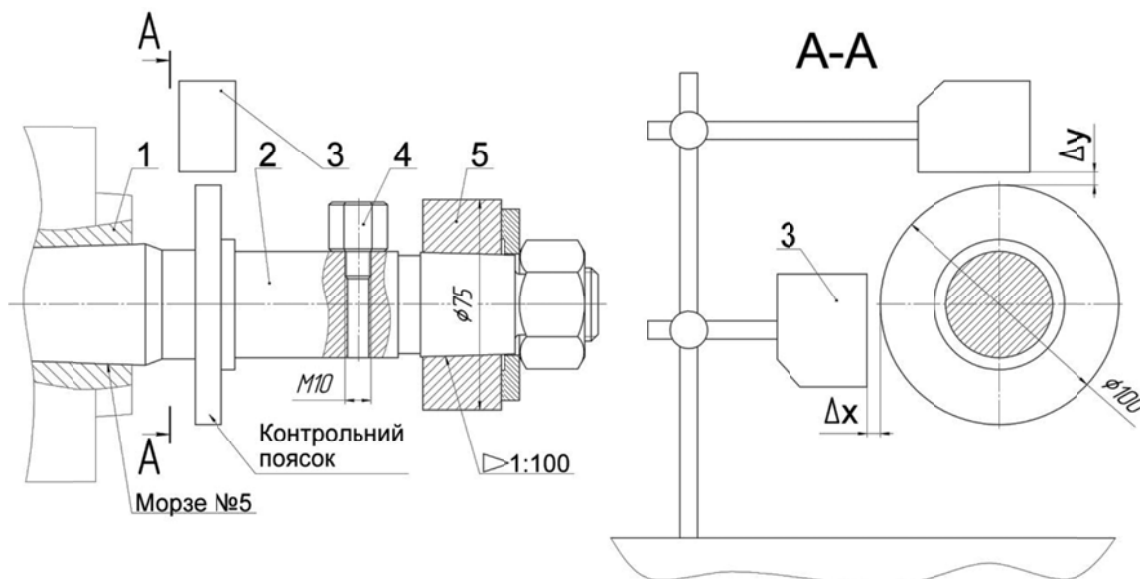


Рис. 3. До опису конструкції та схеми закріплення прецизійної оправки:

1 – шпиндель; 2 – прецизійна оправка; 3 – лазерний датчик; 4 – змінний вантаж; 5 – зразок-виріб

Для створення зовнішнього гармонічного навантаження, подібного обробці конструктивно невірноважених заготовок, використовували змінні вантажі 4, які закріплювали в різевому отворі оправки 2.

З метою мінімізації систематичної складової похибки обертання шпинделя, обумовленої відхиленнями форми контрольного пояса прецизійної оправки та похибки відносного розташування основної бази оправки відносно її виконавчих поверхонь, чистову обробку останніх проводили на даному верстаті, а після обробки оправка залишалась незмінно закріпленою в шпинделі протягом виконання всієї серії експериментальних досліджень. Це дало змогу забезпечити радіальне биття контрольного пояса в межах 0,5 мкм.

Обробку зразків-виробів здійснювали токарним прохідним прямим різцем з пластиною з твердого сплаву T15K6, з кутами $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $\gamma = 10^\circ$. В процесі обробки зразків-виробів реалізовувався змінний режим експлуатації, тобто періодичне чергування роботи шпинделя під навантаженням з боку процесу різання та зупинка обертання шпинделя для зняття обробленого і встановлення наступного зразка-виробу. Такий режим експлуатації, а також зміщення шпинделя внаслідок неізотермічного режиму проведення експериментів не дозволили адекватно оцінити зміщення осі шпинделя відносно початку координат. Тому вплив технологічних навантажень оцінювали за середньоквадратичними відхиленнями (СКВ) осі шпинделя у вертикальному та горизонтальному напрямках за 50 обертів шпинделя, що відповідає мінімальному об'єму вибірки для оцінки середньоквадратичного відхилення для рівня значимості $\alpha = 0,05$, похибки визначення СКВ $\Delta\sigma = 0,2$ [6]. Окремі точки траєкторій, що різко виділяються, аналізувалися на належність до однієї генеральної сукупності за критерієм Н. В. Смирнова [6].

Траєкторії обертання шпинделя при різних частотах обертання, силах різання та тиску в карманах ГСО наведено відповідно на рис. 4–6.

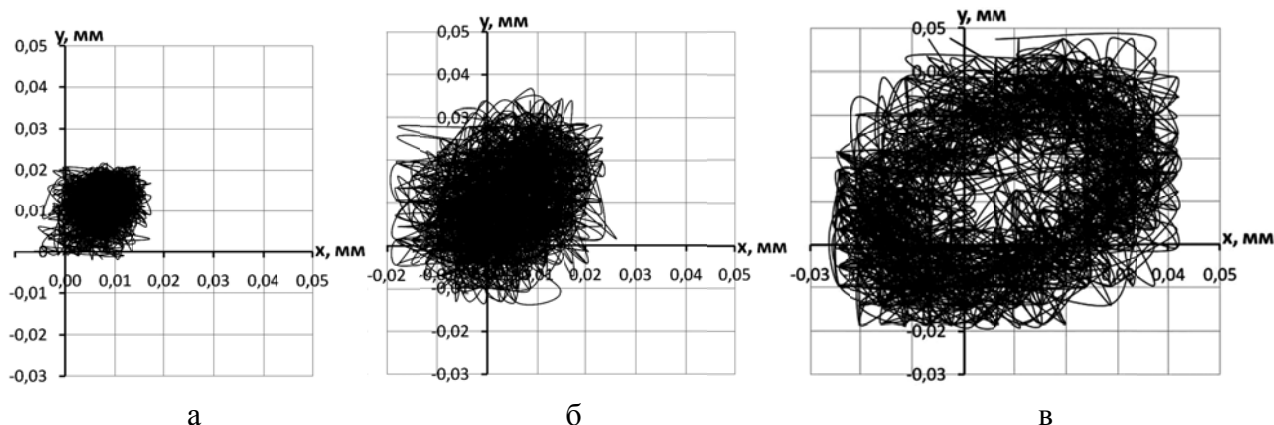


Рис. 4. Траекторії осі шпинделя при варіюванні частотою обертання:
 а – $n = 600 \text{ хв}^{-1}$; б – $n = 1500 \text{ хв}^{-1}$; в – $n = 2400 \text{ хв}^{-1}$

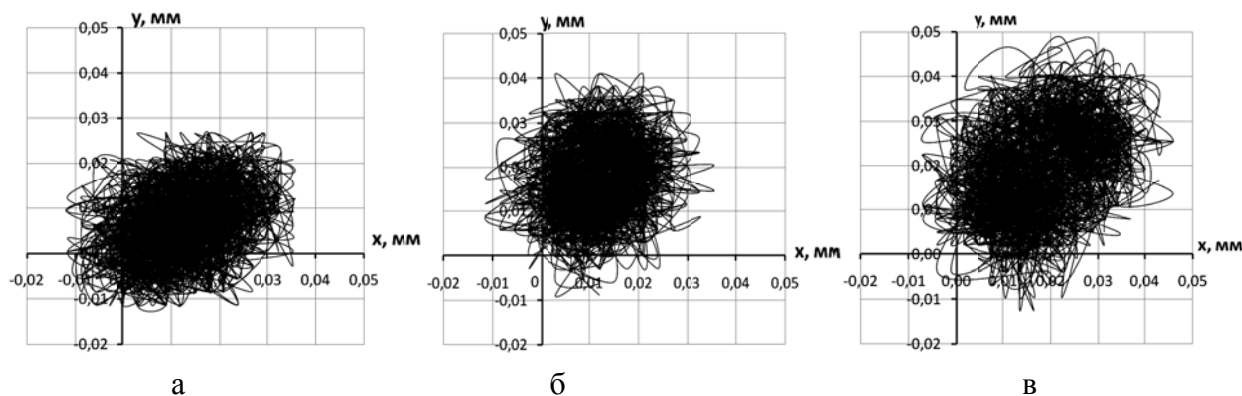


Рис. 5. Траекторії осі шпинделя при різній величині сили різання:
 а – $P_z = 40 \text{ Н}$; б – $P_z = 160 \text{ Н}$; в – $P_z = 280 \text{ Н}$

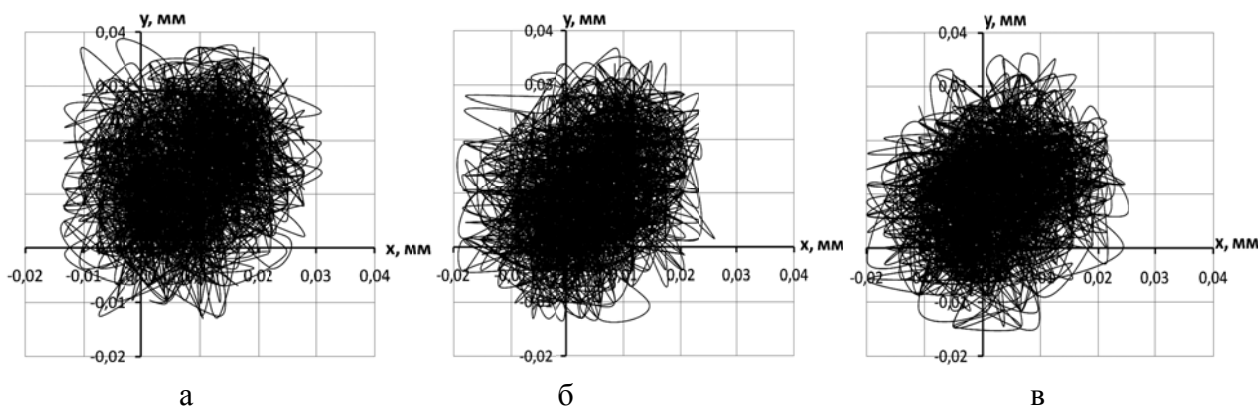


Рис. 6. Траекторії осі шпинделя при різній величині тиску в карманах ГСО:
 а – $p = 2 \text{ МПа}$; б – $p = 3 \text{ МПа}$; в – $p = 4 \text{ МПа}$

Як видно з рис. 4, збільшення частоти обертання шпинделя з 600 хв^{-1} до 2400 хв^{-1} при постійному статичному дисбалансі $D_{ст} = 4360 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}$ викликає зростання розмаху траекторій більш ніж в 2 рази. Це пояснюється збільшенням відцентрової сили P_H , яка пропорційна квадрату кутової швидкості ω обертання шпинделя ($P_H \sim \omega^2$). Збільшення сили різання призводить до відповідного зростання розмаху траекторій. В горизонтальному напрямку розмах траекторій збільшується в 1,2 рази, в той час як у вертикальному приблизно в 1,5 рази. Така відмінність пояснюється обмеженням розсіювання різальним інструментом, який

знаходиться саме в горизонтальній площині (площині формоутворення). При збільшенні тиску в карманах ГСО практично не спостерігається зміни розсіювання положень осі шпинделя за координатними осями.

Середньоквадратичні відхилення положення осі шпинделя у вертикальному σ_y та горизонтальному σ_x напрямках при варіюванні частотою обертання, силою різання та тиском в карманах ГСО наведено на рис. 7.

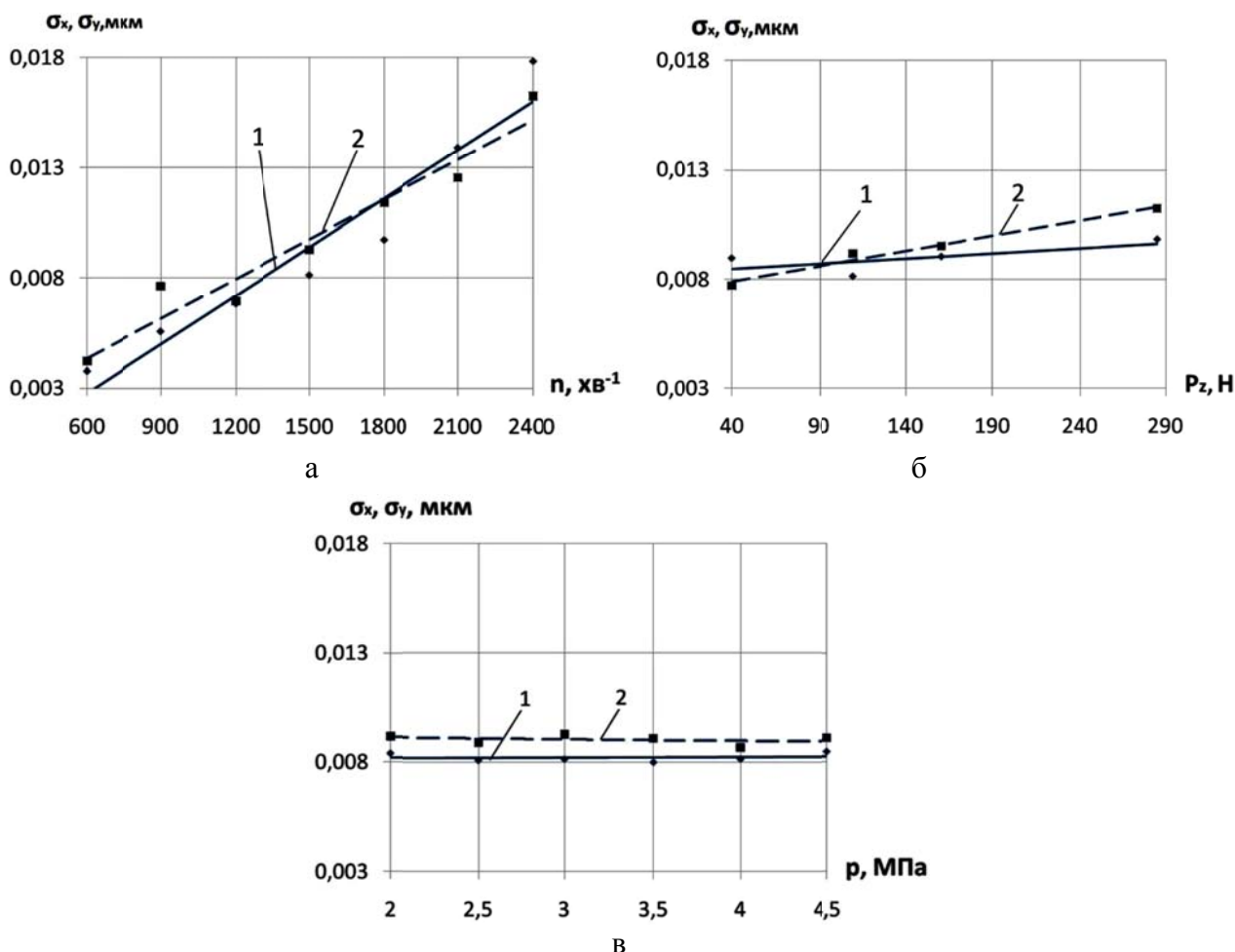


Рис. 7. Середньоквадратичні відхилення положення осі шпинделя у вертикальному σ_y та горизонтальному σ_x напрямках при варіюванні частотою обертання (а), силою різання (б) та тиском (в) в карманах ГСО:

1 – СКВ по осі ОХ; 2 – СКВ по осі ОУ

Як видно з графіків на рис. 7, СКВ положення осі шпинделя повністю корелюються з величинами розмахів траєкторій, що підтверджує можливість використовувати цю статистичну характеристику для оцінки динамічної якості шпиндельних вузлів.

В процесі проведення експериментів частоту дискретизації вимірювань встановлювали пропорційно частоті обертання шпинделя в межах $f_d = 200\text{--}2500$ Гц, з розрахунку забезпечення кожним датчиком 50 вимірювань за один оберт шпинделя, тобто траєкторія одного оберту шпинделя будувалась по 50 точках. Така точність побудови траєкторій дозволила виявити їх яскраво виражений стохастичний характер, що суттєво відрізняється від теоретичних та експериментальних траєкторій, наведених в монографіях [1, 4] та свідчить про складну природу явищ, що відбуваються в гідростатичних опорах і перш за все в мастильному шарі. В якості порівняння на рис. 8 наведено траєкторії трьох обертів шпинделя побудовані за результатами вимірювань з частотами дискретизації 200 Гц та 2000 Гц.

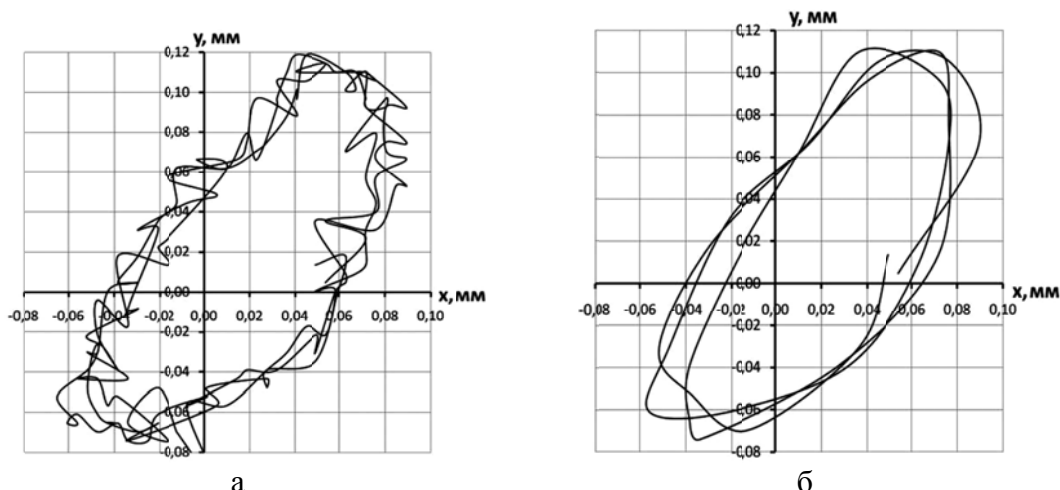


Рис. 8. Траєкторії осі шпинделя при різній частоті дискретизації:
 а – $f_d = 2000$ Гц; б – $f_d = 200$ Гц

Таким чином, видно, що при наявності зовнішнього гармонічного навантаження наближені до кола траєкторії обертання шпинделя на гідростатичних опорах можна отримати за умови малої частоти дискретизації вимірювальної апаратури. Проте, низька частота дискретизації не дасть змоги виявити такі складні для діагностування явища, як дрібношвидкісний вихор, та проаналізувати вплив на параметри траєкторій експлуатаційних параметрів та навантажень.

ВИСНОВКИ

Експериментальним шляхом встановлено вплив тиску в карманах ГСО та експлуатаційних навантажень на розсіювання положення осі шпинделя. Найбільший вплив на величину СКВ положення осі шпинделя при наявності дисбалансу оброблюваної заготовки здійснює частота обертання шпинделя. Зміна величини тиску практично не впливає на СКВ осі шпинделя. Кореляція з величинами розмахів траєкторій дозволяє використовувати СКВ положення осі шпинделя для оцінки динамічної якості шпиндельних вузлів. Стохастичний характер траєкторій свідчить про складну природу явищ, що відбуваються в гідростатичних опорах, вимагає необхідності застосування вимірювальної апаратури з високою роздільною здатністю. Перспективним напрямком подальших досліджень є поглиблений аналіз характеристик траєкторій зокрема з метою оцінки впливу на точність обробки таких явищ, як дрібношвидкісний вихор.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Пуш А. В. Шпиндельные узлы : Качество и надежность / А. В. Пуш. – М. : Машиностроение, 1992. – 228 с.
2. Соколовский А. П. Точность механической обработки и пути ее повышения / А. П. Соколовский. – М. : Машигиз, 1951. – 487 с.
3. Юркевич В. В. Экспертная система для токарной обработки / В. В. Юркевич // Вестник машиностроения. – 2010. – № 6. – С. 73–76.
4. Струтинський В. Б. Статистична динаміка шпиндельних вузлів на гідростатичних опорах : монографія / В. Б. Струтинський, Д. Ю. Федориненко. – Ніжин : Аспект-Поліграф, 2011. – 464 с.
5. Савин Л. А. Моделирование роторных систем с подшипниками жидкостного трения / Л. А. Савин, О. В. Соломин. – М. : Машиностроение, 2006. – 444 с.
6. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний / М. Н. Степнов. – М. : Машиностроение, 1985. – 232 с.