

УДК 621.941.08

С.П. Сапон, ст. викладач

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ОБЕРТАННЯ ШПИНДЕЛЯ

Запропонована методика експериментального визначення траєкторій обертання шпинделя на основі використання високоточних безконтактних триангуляційних лазерних датчиків положення та цифрових засобів оброблення інформації. Описано конструкцію та принцип роботи вимірювальної апаратури та спорядження експериментального стенда. Наведено приклади побудови траєкторій обертання шпинделя на гідростатичних опорах.

Ключові слова: шпиндель, експериментальні дослідження, траєкторія, лазерний триангуляційний датчик, гідростатичні опори.

Предложена методика экспериментального определения траекторий вращения шпинделя на основе использования высокоточных бесконтактных триангуляционных лазерных датчиков положения и цифровых средств обработки информации. Описаны конструкция и принцип работы измерительной аппаратуры и оснастки экспериментального стенда. Приведены примеры построения траекторий вращения шпинделя на гидростатических опорах.

Ключевые слова: шпиндель, экспериментальные исследования, траектория, лазерный триангуляционный датчик, гидростатические опоры.

Method is proposed for experimental determine the trajectories of spindle rotation, using high-precision non-contact laser triangulation position sensors and digital processing. The design and principle of operation of the measuring apparatus and equipment the experimental stand are described. The examples of trajectories of the spindle with hydrostatic supports are present.

Key words: spindle, experimental studies, trajectory, laser triangulation sensor, hydrostatic support.

Постановка проблеми. Точність робочих рухів формоутворюючих вузлів технологічного обладнання безпосередньо впливає на показники точності обробленої деталі. Одним з основних вихідних параметрів точності верстатів є траєкторія обертання шпинделя. Відомо, що на шпиндельний вузол припадає від 50 до 80 % сумарної похибки металорізального верстата [1]. Відповідно одним з головних завдань оцінювання ефективності роботи шпиндельного вузла є визначення точності його обертання. Основою методичного підходу до визначення точності обертання шпинделя є оцінювання характеристик траєкторій обраних фіксованих точок, розташованих на допоміжних базах шпинделя, що визначають положення заготовки, пристрою або інструменту. Проте не завжди наявні засоби вимірювання дозволяють здійснити безпосереднє визначення положення названих точок. Це зумовило широке застосування методик визначення точності обертання шпинделя з використанням контрольних оправок, сфер тощо [2; 3; 4]. Шпинделі сучасних прецизійних верстатів забезпечують високу точність обертання, порівняно з точністю контрольного оснащення. Тому під час досліджень точності шпиндельних вузлів постає актуальна проблема підвищення точності вимірювальних засобів та розроблення методик, що дозволяють підвищити точність експериментального визначення характеристик траєкторій шпинделя.

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідження траєкторій осі оброблюваної заготовки та інструменту були започатковані А.П. Соколовським у 50-х роках минулого століття [5]. Однак через недосконалість вимірювальної апаратури, запропонована ним методика не забезпечила високої точності.

Заснований професором А.С. Проніковим програмний метод випробувань [6] дозволяє оцінювати параметри надійності та якості верстатів з використанням сучасної вимірювальної техніки та інформаційних технологій [7].

Сучасні методики контролю точності обертання прецизійних шпинделів базуються на безконтактному вимірюванні лінійних зміщень по еталонних поверхнях вимірювальної оправки [3; 4]. У МДТУ «СТАНКІН» В.В. Юркевичем створена система експериментальних досліджень траєкторій формоутворення на токарних верстатах [8]. Як безконтактні датчики переміщення використовувалися вихретокові датчики серії АЕ2Х з частотним діапазоном до 1000 Гц, похибкою вимірювання в межах 3 мкм при 20 °С.

Вченими технічного університету м. Комсомольськ-на-Амурі точність обертання високошвидкісних шпинделів на газостатичних опорах вимірювалась ємкісними датчиками [9] та методом віброакустичної емісії [10]. В обох випадках для побудови траєкторій сигнал з датчиків повинен пройти низку перетворень, що не забезпечує адекватність відтворення вібраційного сигналу, особливо його високочастотної складової, яка характеризує шорсткість обробленої поверхні. В роботі [11] індійськими вченими здійснювалось вимірювання ємкісним датчиком радіального биття високошвидкісного шпинделя з подальшим аналізом складових радіального биття регресійним методом. Недоліком цього підходу щодо оцінювання точності обертання шпинделя є використання тільки одного датчика та малий робочий діапазон ($\pm 0,25$ мм).

Таким чином, рівень існуючих методик контролю точності обертання шпинделів визначається типом вимірювальних приладів, принципом вимірювання, ступенем автоматизації, роздільною здатністю засобів вимірювання та трудомісткістю процесу контролю.

Сучасні прецизійні верстати здатні розвивати частоту обертання шпинделя понад 20000 хв^{-1} та точність центрування шпинделя під дією навантаження з боку процесу різання в межах $0,1 \dots 0,5$ мкм. Враховуючи постійне зростання вимог до точності обробки та існуючі тенденції розвитку сучасних засобів вимірювання і контролю, актуальним є завдання застосування високоточних, швидкодіючих засобів та відповідних методик визначення точності формують рухів металорізальних верстатів.

Мета статті. Метою статті є розроблення методики експериментального визначення траєкторій обертання шпинделя на гідростатичних опорах на основі використання високоточних триангуляційних лазерних датчиків положення та цифрових засобів оброблення інформації.

Виклад основного матеріалу. Під час розроблення нових та модернізації існуючих конструкцій шпиндельних вузлів необхідно здійснювати визначення їх точнісних параметрів у максимально наближених до реальних умовах експлуатації. При цьому вирішальну роль відіграють точність та частотний діапазон засобів вимірювання. Метод траєкторій є ефективним засобом моделювання реальних динамічних процесів шпиндельних вузлів. Форма і розміри траєкторії руху шпинделя визначаються точнісними параметрами опор, експлуатаційними параметрами, а також видом і характером технологічного навантаження.

Дослідження траєкторій обертання шпинделя здійснювалися на експериментальному стенді (рис. 1) на базі прецизійного токарно-гвинторізного верстата моделі УТ16А, шпиндель якого встановлений на гідростатичних опорах.

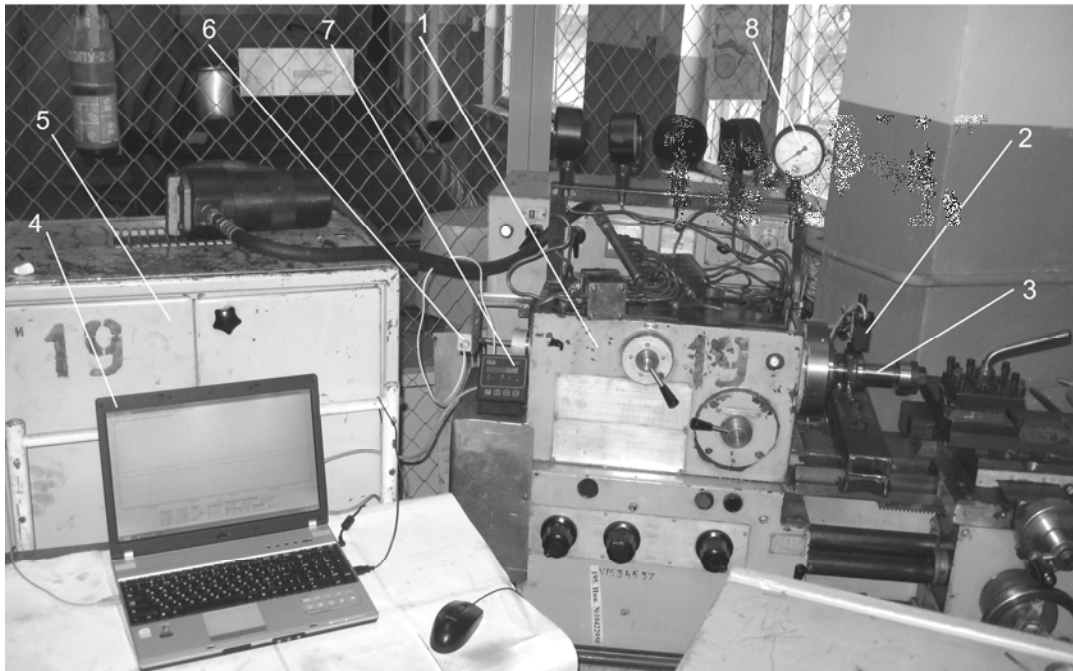


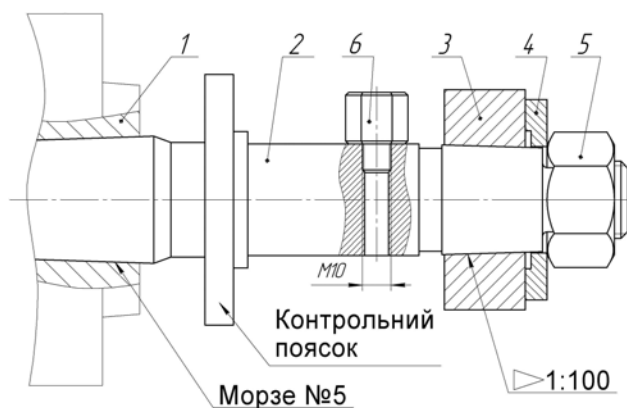
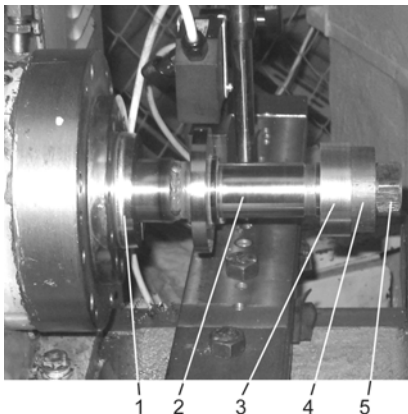
Рис. 1. Загальний вигляд експериментального стенда:
1 – прецизійний токарно-гвинторізний верстат УТ16А; 2 – триангуляційний лазерний датчик;
3 – прецизійна оправка; 4 – ноутбук; 5 – гідростанція; 6 – енкодер;
7 – спеціалізований електронний тахометр; 8 – манометр

Метою експериментальних досліджень було визначення впливу глибини різання, подачі, частоти обертання, тиску в гідростатичних опорах та статичного дисбалансу на показники траєкторій обертання шпинделя.

Змінні вантажі для створення гармонічного навантаження та заготовки зразків-виробів, що оброблювалися під час досліджень, закріплювали на прецизійній оправці, яку встановлювали в конічному отворі шпинделя верстата (рис. 2).

Тиск у карманах гідростатичної опори встановлювали за допомогою регулятора дросельного типу, а контролювали за показаннями манометрів 8.

Прецизійна оправка має контрольний поясок, з яким взаємодіють лазерні датчики. З метою мінімізації похибки відносного розташування основної бази відносно виконавчих поверхонь оправки, чистову обробку останніх проводили на цьому верстаті, а після оброблення оправка залишалась незмінно закріпленою у шпинделі протягом виконання всієї серії експериментальних досліджень. Це дало змогу забезпечити радіальне биття контрольного пояса в межах 0,5 мкм. Недопустимість систематичної складової похибки обертання шпинделя, обумовленої відхиленнями форми контрольного пояса прецизійної оправки, здійснювалось за способом перевертання [3].



a

б

Рис. 2. До опису конструкції та схеми закріплення прецизійної оправки: 1 – шпindelь; 2 – прецизійна оправка; 3 – оброблювана заготовка; 4 – шайба; 5 – гайка; 6 – змінний вантаж

Для дослідження впливу на показники траєкторії шпинделя зовнішнього статичного дисбалансу використовували змінні вантажі п'яти конструктивних виконань (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристика змінних вантажів

Номер вантажу	I	II	III	IV	V
Маса, $\cdot 10^{-3}$ кг	49,2	70,9	111,1	142,3	154,4
Координата Y_c , 10^{-3} м	7,65	12,18	20,48	27,14	29,37
Ексцентриситет e , $\cdot 10^{-3}$ м	27,15	31,68	39,98	46,64	48,87
Дисбаланс, $\cdot 10^{-6}$ кг·м	1336,84	2246,11	4440,98	6636,25	7545,09

На напрямних станини верстата закріплювалась плита 4, в якій встановлено стійку 3 з двома безконтактними лазерними датчиками 2, розташованими під кутом 90^0 , що відповідає декартовій системі координат (рис. 3).

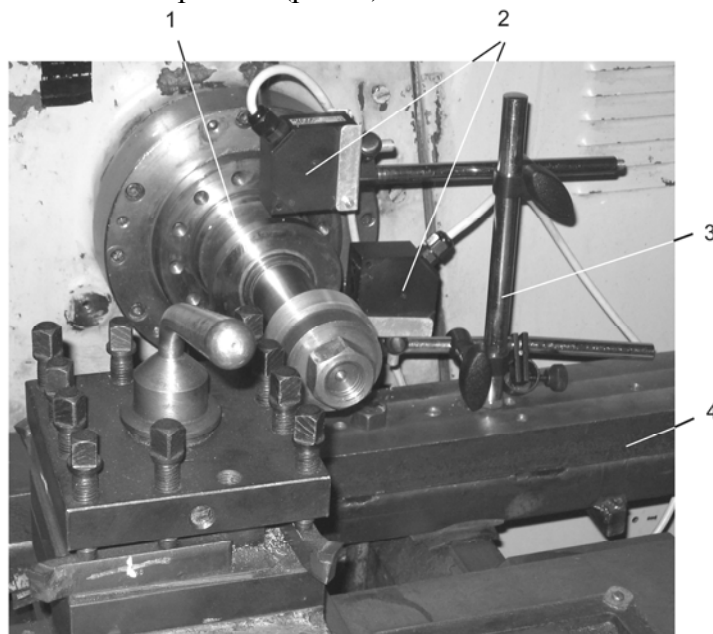


Рис. 3. Схема закріплення лазерних датчиків: 1 – прецизійна оправка; 2 – датчики; 3 – стійка; 4 – плита

Точність взаємного розташування датчиків під кутом 90^0 забезпечувалась наявністю на торці контрольного пояса прецизійної оправки двох рисок, які наносились з використанням універсальної ділильної головки з точністю $\pm 0,033^0$. Регулювання положення датчиків здійснювали, суміщуючи промінь лазера з рисою.

Із врахуванням робочих процесів, що відбуваються в технологічній системі верстата, та необхідних параметрів вимірювання (відстань до об'єкта, діапазон вимірювання, роздільна здатність, частота оновлення даних тощо) для безконтактного вимірювання відхилень осі шпинделя використовували безконтактні лазерні триангуляційні датчики типу РФ603.2-10/2-485-U-IN-AL-CG (рис. 4), які не потребують підсилювальних пристроїв та мають можливість виводу вихідного сигналу як в аналоговій, так і цифровій формі. В основу роботи датчика покладений принцип оптичної триангуляції [12] (рис. 4, б). Випромінювання напівпровідникового лазера 1 фокусується об'єктивом 2 на об'єкті 6. Розсіяне на об'єкті випромінювання об'єктивом 3 збирається на CMOS-лінійці 4. Переміщення об'єкта 6-6' викликає відповідне переміщення зображення. Процесор сигналів 5 розраховує відстань до об'єкта за положенням зображення світлової плями на лінійці 4.

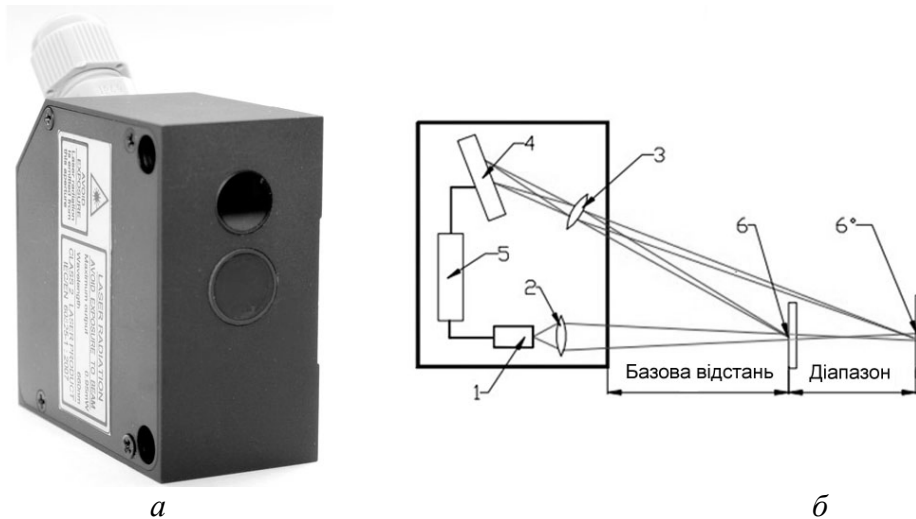


Рис. 4. Лазерний триангуляційний датчик а) та схема вимірювання відстаней б):
1 – лазер, 2,3 – об'єктиви, 4 – CMOS-лінійка, 5 – процесор, 6 – контрольований об'єкт

Робочий діапазон триангуляційних лазерних датчиків моделі РФ603.2-10/2-485-U-IN-AL-CG становить 2 мм, лінійність $\pm 0,002$ мм, роздільна здатність 0,2 мкм, максимальна частота дискретизації 9,4 кГц [12].

Реєстрація та відображення сигналів з лазерних датчиків реалізовувалась за допомогою цифрового осцилографа IRIS (рис. 5) та ноутбука з програмним забезпеченням для цифрового оброблення сигналів.

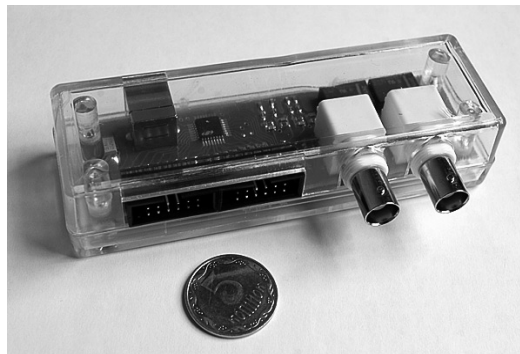


Рис. 5. Загальний вигляд цифрового осцилографа IRIS

Цифрові осцилографи IRIS можуть працювати в режимах двоканального осцилографа, спектр-аналізатора, самописця, 16-и канального логічного аналізатора, 8-и канального логічного генератора. Максимальна частота дискретизації сигналу, що реєструється осцилографом, – 100 кГц [13].

Верстат УТ16А має можливість безступінчастого регулювання частоти обертання шпинделя, числове значення якого фіксувалось за показаннями спеціалізованого електронного тахометра Б-ТМ-НП1210-СК03-ІВ5ВА-І з точністю $\pm 0,5$ хв⁻¹. Цей тахометр 2 визначає частоту обертання шпинделя за частотою електричних імпульсів, що надходять від енкодера 1 моделі Э4-16, з'єданого через пружину 3 та стакан 4 зі шпинделем 5 (рис. 6).

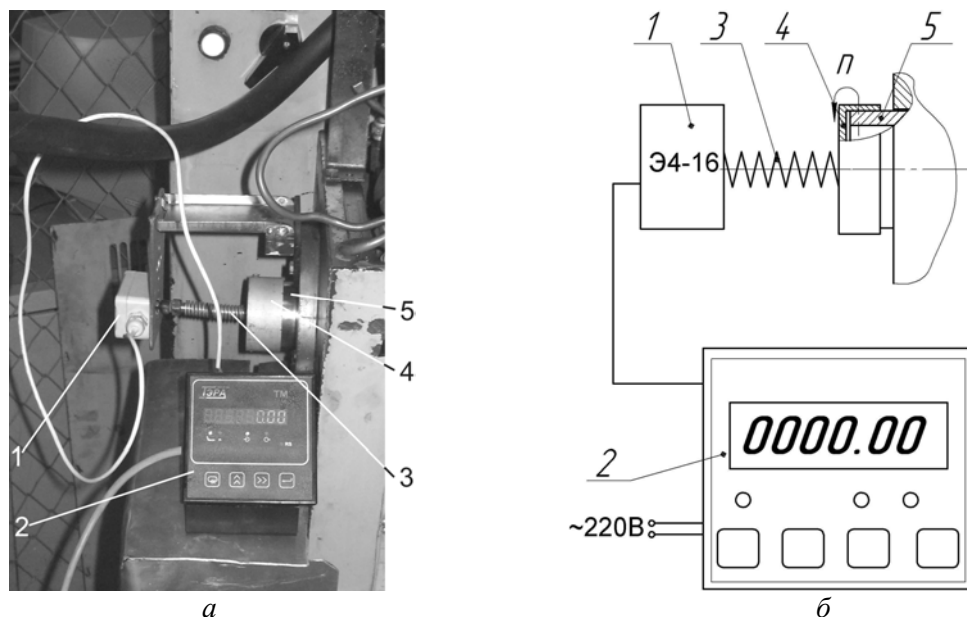


Рис. 6. Загальний вигляд (а) та принципова схема визначення частоти обертання шпинделя (б):
 1 – енкодер; 2 – електронний тахометр; 3 – пружина; 4 – стакан; 5 – шпиндель

Перед початком кожної серії експериментів визначалось початкове положення x_0 , y_0 , точки відбиття лазерного променя кожного з датчиків відносно початку робочого діапазону S (рис. 7):

$$x_0 = \frac{U_{0X}}{U_{max}} \cdot S; \quad y_0 = \frac{U_{0Y}}{U_{max}} \cdot S, \quad (1)$$

де U_{0X} , U_{0Y} – середньоарифметичні значення сигналу з лазерного датчика при необертотому шпинделі та максимальному тиску в гідростатичних опорах, передбаченому серією експериментів, В;

U_{max} – максимальне значення вихідного сигналу з лазерного датчика, $U_{max} = 10$ В [12];
 S – робочий діапазон лазерних датчиків, $S = 2$ мм.

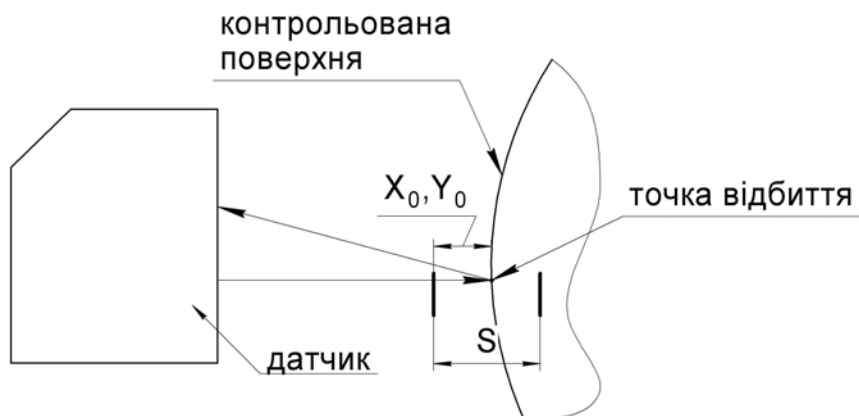


Рис. 7. Схема визначення початкового положення точки відбиття лазерного променя

Частоту дискретизації вимірювань встановлювали пропорційно частоті обертання шпинделя в межах $f_d = 200-2500$ Гц, що забезпечує під час побудови траєкторій однаково кількість точок за один оберт.

При дослідженнях здійснювали оброблення заготовок зразків-виробів типу диск зі сталі 45, діаметром 80 мм, виготовлених відповідно до вимог стандарту [14]. Заготовки закріплювались на конічній поверхні прецизійної оправки (див. рис. 2). Оброблення

здійснювали токарним прохідним прямим різцем з пластинкою з твердого сплаву Т15К6, з кутами $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$. $\alpha = 8^\circ$; $\gamma = 10^\circ$. При цьому реалізовувалась наступна методика проведення експерименту:

– перед проведенням дослідів здійснено планування експерименту методом ортогонального планування 2-го порядку [15], інтервали варіювання та рівні факторів наведено в табл. 2;

Таблиця 2

Рівні варіювання факторів

Інтервал варіювання і рівні факторів	Натуральні значення факторів				
	n, хв ⁻¹	S, мм/об	t, мм	D _{ст} , ·10 ⁻⁶ кг·м	p, МПа
Інтервал варіювання	900	0,072	0,4	2195	1,0
Верхня «зіркова точка» (-1,414)	2770	0,23	1,4	7545,09	4,4
Верхній рівень (+1)	2400	0,2	1,2	6636,25	4,0
Нульовий рівень (0)	1500	0,128	0,8	4440,98	3,0
Нижній рівень (-1)	600	0,056	0,4	2246,11	2,0
Нижня «зіркова точка» (-1,414)	230	0,026	0,2	1336,84	1,6

– встановлювали датчики та визначали початкове положення точки відбиття лазерного променя за залежностями (1);

– на конічній поверхні прецизійної оправки закріплювали зразки-вироби;

– відповідно до плану проведення експерименту (див. табл. 2) настроювали верстат та здійснювали оброблення зразків-виробів, фіксуючи лазерними датчиками зміщення шпинделя у двох взаємно ортогональних площинах;

– результати вимірювань записувалися у файл формату «.xls»;

– у програмі Microsoft Office Excel визначали відхилення осі шпинделя в лінійних величинах за залежностями:

$$x_i = \frac{U_{xi}}{U_{max}} \cdot S - x_0; \quad y_i = \frac{U_{yi}}{U_{max}} \cdot S - y_0, \quad (2)$$

де U_{xi} , U_{yi} – сигнал з датчика у відповідний момент часу, В;

– здійснювали статистичний аналіз результатів вимірювань за методикою [16];

– засобами графічного редактора Microsoft Office Excel будували траєкторії обертання шпинделя (рис. 8).

Окремі точки траєкторій, що різко виділяються, аналізувалися на належність до однієї генеральної сукупності за критерієм Н.В. Смирнова [16]. Враховуючи, що варіювання режимами різання забезпечувало різну тривалість оброблення, для побудови траєкторій використовували вибірки об'ємом, що відповідають однаковій кількості вимірювань за один оберт шпинделя. Частота дискретизації сигналу на осцилографі встановлювалась з розрахунку забезпечення 50 вимірювань за один оберт шпинделя. Побудову траєкторій здійснювали для 40 обертів шпинделя, тобто об'єм вибірки становив $N = 2000$, що перевищує значення $N_{min} = 385$, рекомендоване в довіднику [16] для рівня значимості $\alpha = 0,05$, похибок визначення математичного сподівання $\Delta_m = 0,01$ і середньоквадратичного відхилення $\Delta_\sigma = 0,01$.

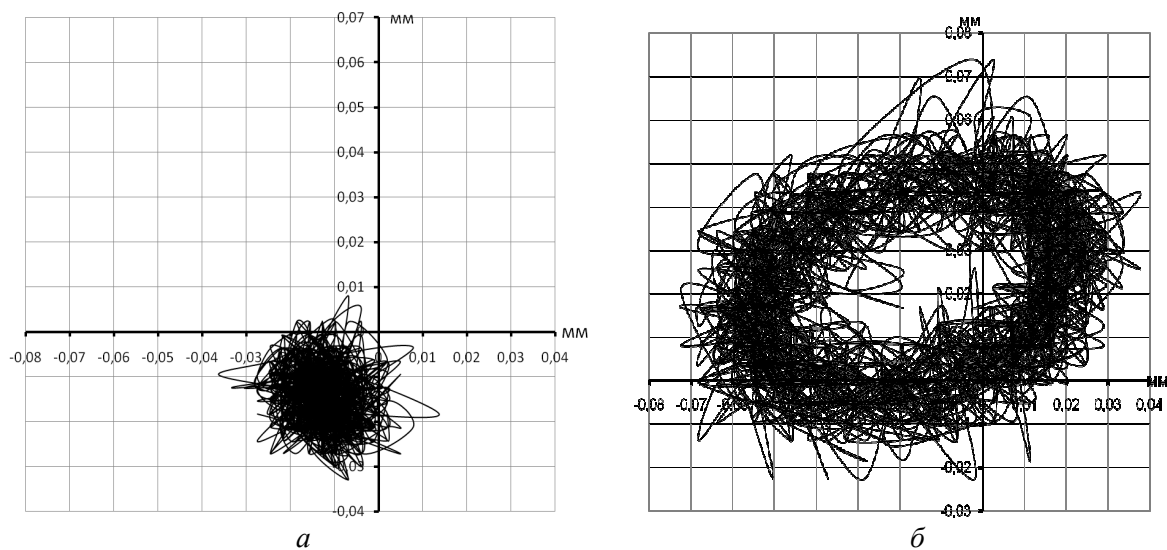


Рис. 8. Траєкторії обертання шпинделя токарного верстата при різних технологічних навантаженнях та експлуатаційних параметрах:

$a - n = 1500 \text{ хв}^{-1}; t = 0,8 \text{ мм}; S = 0,128 \text{ мм/об}, p = 3 \text{ МПа}, D_{ст} = 1336,84 \text{ г.мм};$

$b - n = 2400 \text{ хв}^{-1}; t = 1,2 \text{ мм}; S = 0,056 \text{ мм/об}, p = 2 \text{ МПа}, D_{ст} = 6636,25 \text{ г.мм};$

Оцінювання точності обертання шпинделя здійснювали за статистичними характеристиками параметрів траєкторій:

- математичні сподівання проекцій випадкового вектора зміщень осі шпинделя на осі OX та OY ;
- тренд математичного сподівання центра траєкторії відносно геометричної осі гідростатичної опори;
- середньоквадратичне відхилення зміщень осі шпинделя за координатними осями OX та OY ;
- поле розсіювання зміщень осі шпинделя за координатними осями OX та OY .

Висновки. Запропонована у статті експериментальна методика дає змогу в умовах дії реальних технологічних навантажень оцінити точність обертання шпинделя за статистичними характеристиками параметрів траєкторії його обертання.

Застосування прецизійних триангуляційних лазерних датчиків дозволило здійснювати вимірювання зміщень шпинделя у двох взаємно перпендикулярних напрямках з точністю до 0,2 мкм. Завдяки цифровій формі представлення результати експериментальних досліджень можуть бути використані для подальшого аналізу в математичних пакетах. Зокрема, перспективним напрямком подальших досліджень є доповнення цієї методики спектральним аналізом, що дасть змогу додатково оцінити інші параметри траєкторій обертання шпинделя.

Список використаних джерел

1. Пуш А. В. Шпиндельные узлы: качество и надежность / А. В. Пуш. – М. : Машиностроение, 1992. – 228 с.
2. Станки металлорежущие. Схемы и способы измерений геометрических параметров: ГОСТ 22267-76. – [Действ. от 1988-01-01]. – М. : Издательство стандартов, 1988. – 141 с.
3. Юркевич В. В. Методы испытаний обрабатывающих станков / В. В. Юркевич // Машиностроитель. – 2006. – № 10. – С. 30-39.
4. Юркевич В. В. Испытания, контроль и диагностика металлообрабатывающих станков : монография / В. В. Юркевич, А. Г. Схиртладзе, В. П. Борискин. – Старый Оскол : ООО «ГНТ», 2006. – 552 с.
5. Соколовский А. П. Точность механической обработки и пути ее повышения / А. П. Соколовский. – М. : Машгиз, 1951. – 487 с.

6. *Проников А. С.* Программный метод испытания металлорежущих станков / А. С. Проников. – М. : Машиностроение, 1985. – 288 с.
7. *Проников А. С.* Параметрическая надежность машин / А. С. Проников. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 559 с.
8. *Юркевич В. В.* Экспертная система для токарной обработки / В. В. Юркевич // Вестник машиностроения. – 2010. – № 6. – С. 73-76.
9. *Космынин А. В.* Анализ точности вращения высокоскоростных шпинделей с газостатическими опорами / А. В. Космынин, С. П. Чернобай // СТИН. – 2006. – № 6. – С. 10-13.
10. *Контроль* положения шпинделя на газостатических опорах методом виброакустической эмиссии / А. С. Хвостиков, А. В. Космынин, В. С. Щетинин и др. // Вестник ОГУ. – 2012. – № 9 (145). – С. 134-137.
11. *S. Denis Ashok.* Regression method for identifying spindle radial errors of a miniaturized machine tool / S. Denis Ashok G. L. Samuel // Journal of Studies on Manufacturing. – 2010. – Volume 1. – Issue 1. – P. 26-33.
12. *Триангуляционные лазерные датчики.* Серия РФ603. Руководство по эксплуатации. – Минск : ООО «РИФТЭК», 2011. – 46 с.
13. *Цифровой осциллограф IRIS.* Техническое описание и инструкция по эксплуатации. –К. : ООО «Видео Интернет Технологии», 2007. – 12 с.
14. *Станки металлорежущие.* Образцы-изделия для проверки точности обработки. Общие технические требования: ГОСТ 25443-82. – [Действ. от 1982-09-09]. – М. : Издательство стандартов, 1983. – 5 с.
15. *Душинский В. В.* Оптимизация технологических процессов в машиностроении / В. В. Душинский, Е. С. Пуховский, С. Г. Радченко. – К. : Техника, 1977. – 176 с.
16. *Степнов М. Н.* Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник / М. Н.Степнов. – М. : Машиностроение, 1985. – 232 с.